

Kerkko Niemi

Aurinkojäähdytysjärjestelmän toteutus

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Huhtikuu 2012




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

| | | | |
|--|-----------------------|---|--|
|  | | Opinnäytetyön päivämäärä | |
| Tekijä(t) Kerkko Niemi | | Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka | |
| Nimeke Aurinkojäähdytysjärjestelmän toteutus | | | |
| Tiivistelmä <p>Tutkimuksen tavoite oli esittää suunnitelmat toimistorakennuksen aurinkojäähdytysjärjestelmän toteuttamiseen. Työ tehtiin Savosolar-yrityksen toimeksiannosta. Mitoitukset suunnitelmiin toteutettiin IDA ICE- ja Get Solar- simulointiohjelmilla. Tarkoituksena oli kehittää energiatehokas järjestelmä, jossa hyödynnetään mahdollisimman paljon Suomessa valmistettuja komponentteja.</p> <p>Toimistorakennuksen jäähdytysenergian tarve ja jäähdytystehon tarve laskettiin IDA ICE-ohjelmalla. Saatujen tietojen perusteella rakennukseen valittiin adsorptiotyyppinen jäähdytin. Rakennuksen jäähdytystarpeen ja jäähdytinvalinnan perusteella mitoitettiin Get Solar-ohjelmalla tarvittava aurinkokeräinmäärä.</p> <p>Tulokseksi saatiin järjestelmä, joka toimii hyvällä hyötysuhteella ja matalilla käyttölämpötiloilla. Järjestelmä on erityisesti suunniteltu Suomen ilmasto-olosuhteisiin. Suunniteltu järjestelmä pystyy kattamaan koko jäähdytystarpeen, jos auringonpaistetta on saatavilla. Järjestelmää pystytään käyttämään myös lämmitykseen tarvittaessa.</p> <p>Tulevaisuudessa järjestelmään tulisi suunnitella automatiikka, jolla pystyttäisiin käyttämään aurinkojäähdytysjärjestelmän koko potentiaali. Järjestelmän rakentamisen jälkeen tulisi mittaustuloksia verrata mitoitukseen ja selvittää mitoituksen paikkaansapitävyys.</p> | | | |
| Asiasanat (avainsanat) Aurinkojäähdytys, absorptiolämpöpumppu, aurinkokeräin | | | |
| Sivumäärä 47+2 | Kieli Suomi | URN | |
| Huomautus (huomautukset liitteistä) | | | |
| Ohjaavan opettajan nimi Aki Valkeapää | | Opinnäytetyön toimeksiantaja Savosolar Oy | |

DESCRIPTION

| | | | |
|---|----------------------------|--|--|
|  <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p> | | Date of the bachelor's thesis | |
| Author(s) Kerkko Niemi | | Degree programme and option Building services | |
| Name of the bachelor's thesis Design of solar cooling system | | | |
| Abstract <p>Base of the thesis was the request of solar cooling system planning by Savosolar. Planning would be used to construct a solar cooling system for an office building in Mikkeli. In planning IDA ICE- and Get Solar simulation programs were used for calculating cooling demands for the building and amount of solar collector needed for the system. Main points for the design were good energy efficiency and usage of components manufactured in Finland.</p> <p>Based on the cooling demand calculation with IDA ICE adsorption type cooler was chosen. Based on the information of the cooler number of solar flat plate collector were calculated using Get Solar program.</p> <p>As the results we achieved system design which is energy efficient and operates with low driving temperatures. System is specified for Finnish climate. System can cover whole cooling demand of the building if solar irradiation is present. System can be used for both heating and cooling.</p> <p>In future building automation system should be designed for the solar cooling system. Building automation has a big part in the system efficiency. Design results should be compared to on line data for the system after the system is built.</p> | | | |
| Subject headings, (keywords) Solar cooling, adsorption heat pump, flat plate collector | | | |
| Pages 47+2 | Language Finnish | URN | |
| Remarks, notes on appendices | | | |
| Tutor Aki Valkeapää | | Bachelor's thesis assigned by Savosolar Oy | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 1 |
| 2 | AURINKO ENERGIALÄHTEENÄ..... | 2 |
| 3 | AURINGON HYÖDYNTÄMINEN..... | 3 |
| 3.1 | Aurinkokeräimet | 3 |
| 3.1.1 | Tasokeräin..... | 5 |
| 3.1.2 | Tyhjiöputkikeräin | 6 |
| 3.2 | Keräinten sijoitus ja suuntaus..... | 8 |
| 4 | AURINKOLÄMMITYS | 9 |
| 4.1 | Aurinkolämmitysjärjestelmät..... | 11 |
| 4.2 | Aurinkolämmitysjärjestelmän osat..... | 11 |
| 4.2.1 | Aurinkokeräimet | 11 |
| 4.2.2 | Lämmönvaihtimet..... | 13 |
| 4.2.3 | Lämmönsiirtoneste | 14 |
| 4.2.4 | Lämmivesivaraaja..... | 14 |
| 4.2.5 | Säätölaitteisto..... | 15 |
| 4.2.6 | Pumppuryhmä..... | 16 |
| 4.2.7 | Varolaitteisto..... | 16 |
| 5 | RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS..... | 17 |
| 5.1 | Rakennusten jäähdytysjärjestelmät | 17 |
| 5.2 | Aurinkojäähdytys | 18 |
| 5.3 | Aurinkojäähdytysjärjestelmät | 19 |
| 5.3.1 | Keräimet aurinkojäähdytyksessä | 20 |
| 5.3.2 | Jäähdyttimen valinta | 21 |
| 5.3.3 | Kylmävarasto | 21 |
| 5.3.4 | Välijäähdytyspiiri | 21 |
| 6 | ABSORPTIO JA ADSORPTIO..... | 22 |
| 6.1 | Absorptiojäähdyttimen toiminta..... | 22 |
| 6.2 | Absorptiojäähdyttimet..... | 23 |
| 6.3 | Adsorptiojäähdyttimen toiminta..... | 23 |
| 6.3.1 | Adsorptiojäähdyttimet | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.4 | Adsorbenttimateriaalit..... | 30 |
| 6.4.1 | Zeoliitit | 30 |
| 6.4.2 | Silikageeli | 30 |
| 7 | RAKENNUSKOHDE | 31 |
| 7.1 | Laitteiston vaatimukset | 31 |
| 7.2 | Jäähdytystarve | 32 |
| 8 | LAITTEISTON MITOITUS | 33 |
| 8.1 | Jäähdyttimen valinta..... | 33 |
| 8.2 | Keräimien mitoitus..... | 33 |
| 8.3 | Keräimien sijoitus | 35 |
| 8.4 | Nestejäähdyttimen mitoitus..... | 37 |
| 8.5 | Lämpö- ja kylmävaraajien mitoitus | 38 |
| 8.6 | Putkilinjat | 39 |
| 8.6.1 | Keräimien putkilinjat..... | 39 |
| 8.7 | KytKentäkaavio | 40 |
| 8.8 | Laitteiston ohjaus | 41 |
| 9 | POHDINTA | 43 |
| | LÄHTEET..... | 45 |
| | LIITTEET | |

1 JOHDANTO

Tutkimuksen tarkoitus on esittää suunnitelmat aurinkojäähdytysjärjestelmän toteuttamiseen. Suunnitelmat tulisivat olla sellaiset, että laitteisto olisi mahdollista rakentaa niiden perusteella. Tämä tarkoittaa eri komponenttien mitoittamista ja yhteensovittamista. Tarkoitus on etsiä kaikki nämä komponentit eri valmistajilta ja koota niistä toimiva kokonaisuus.

Toivomuksena on myös, että järjestelmän komponenteista suuri osa löytyisi suomalaisilta valmistajilta tai pohjoismaista. Järjestelmän rakennustyöt alkavat todennäköisesti loppukeväästä 2012. Tämän prototyyppijärjestelmän testauksen jälkeen aurinkojäähdytysjärjestelmästä on tarkoitus tehdä markkinoitava tuotekokonaisuus.

Tutkimus tehdään yhdessä Savosolar-yrityksen kanssa, joka valmistaa aurinkokeräimiä. Järjestelmä suunnitellaan niin, että kyseisen yrityksen tasokeräimiä saadaan mahdollisimman hyvin hyödynnettyä. Tuleva jäähdytin tulee olemaan adsorptiotyyppinen jäähdytin, joka hyödyntää lämpöä jäähdyttäessään vettä. Järjestelmä tulee jo olemassa olevan ammoniakki-jäähdytysjärjestelmän rinnalle täydentämään sitä.

Adsorptiojäähdytin tarvitsee lämpöä tuottaakseen kylmää. Tämä lämpö tuotetaan siis aurinkokeräimillä, jotka sijoitetaan rakennuksen katolle. Sieltä keräimissä lämmitetty vesi kuljetetaan lämminvesivaraajaan, ja hyödynnetään adsorptiojäähdyttimellä tarpeen mukaan.

Jotta aurinkojäähdytysjärjestelmä on mahdollista suunnitella, on oltava taustatietoa kaikista järjestelmään liittyvistä komponenteista, niihin liittyvästä mitoittuksesta sekä adsorptiojäähdyttimen prosessista. Tämän takia työn alussa käydään lävitse auringon säteilyyn, sen keräämiseen, siirtämiseen ja hyödyntämiseen liittyen teoriaa. Toinen teorian osuus on adsorptiolämpöpumppujen teoria ja toiminta ja siihen liittyvät suunnitelmanäkökohdat.

Tavoite työssä on siis suunnitelma toimivasta järjestelmästä, jolla on riittävän lyhyt takaisinmaksuaika. Aurinkojäähdytysjärjestelmästä ja siihen liittyvistä laitteista yritetään tehdä taloudellisesti houkuttava vaihtoehto perinteisten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien rinnalle.

Suurin haaste suunnittelun kannalta on Suomen maantieteellinen sijainti ja ilmasto. Koska aurinkojäähdytysjärjestelmiä ei ole näin pohjoisessa juuri, puuttuu valmis konsepti järjestelmää varten. Suomen pitkien talvien takia järjestelmän käyttöpäiviä on vähemmän vuodessa kuin Keski-Euroopassa. Myös lumen vaikutus on otettava huomioon. Tämä rajaa keräintyyppin tasokeräimeen sen paremman kestävyysvuoksi. Pakkaset rajoittavat myös esimerkiksi adsorptiojäähdyttimen tarvitseman jäähdyttimen suunnittelua. Koska jäähdyttimessä on tarkoitus käyttää vesiriskiä, on pakkasen ja jäätymisvaara otettava tässä myös huomioon.

2 AURINKO ENERGIALÄHTEENÄ

Maapallon elämä perustuu auringosta saatuun energiaan. Auringon säteilystä ovat lähtöisin kaikki uusiutuvat energialähteet: tuuli, vesi ja biomassa. Auringonsäteily ylittää 10 000 kertaisesti maapallon energian tarpeen. Aurinko on iso fuusiopallo, jossa palaa vetyä ja syntyy energiaa. /1./

Lämpöydinreaktion eli fuusion aiheuttamassa muutoksessa vapautuva energia antaa auringolle $3,8 \times 10^{23}$ kW:n tehon. Siitä määrästä maapallolle saapuu $1,7 \times 10^{14}$ kW, joka on n. 20 000 kertaa koko maapallon teollisuuden ja lämmityksen tänä päivänä tarvitsema teho. /2./

Maapallon ilmakehän ulkopuolella säteilyä vastaan kohtisuorassa olevalle 1 m^2 kokoiselle pinnalle lankeavan auringonsäteilyn teho on 1,35- 1,39 kW. Se on nimeltä aurinkovakio. Tämä on energiamäärä, joka auringosta saapuu yhdessä sekunnissa ilmakehän rajalla olevalle 1 m^2 pinnalle. Auringon ja maapallon etäisyysvaihteluiden takia tämä arvo vaihtelee +/- 3,5% vuoden aikana. Ilmakehä kuitenkin pienentää sen arvon n. 60%:iin maan pinnalla. /2. /

Välitön aurinkovakio tarkoittaa sitä auringosta lähtöisin olevaa energiamäärää, joka ilmakehän vaikutuksen jälkeen kohtaa sekunnissa tietyn pinta-alan maan pinnalla. Se on n $0,8 - 1,0 \text{ kW/m}^2$ kirkkaalla säällä. Kun esim. säteilyteho $0,8 \text{ kW/m}^2$ osuu pintaan tunnin ajan, saatu energiamäärä on $0,8 \text{ kWh/m}^2$. /2./

Suomessa saadaan auringonsäteilyä yleisesti luultua enemmän. Suomessa kylmyys yhdistyy mielessä usein pimeään. Kesällä Suomi on aurinkoinen, ja silloin aurinkolämpöä voidaan hyödyntää tehokkaasti. Suomessa lämmityskausi ulottuu usein kesäkuukausiin saakka ja aurinkoenergia voi toimia apulämmönlähteenäkin.

Kesällä auringon säteilyä tulee Suomessa pitkistä päivistä johtuen enemmän kuin Keski-Euroopassa. Talvikuukausina tilanne on päinvastainen, ja talvella auringon paistetta ei riitä hyödynnettäväksi. Suomessa aurinkoenergiaa voidaan käytännössä hyödyntää vain helmikuun lopulta lokakuun alkuun. Lokakuusta helmikuun alkuun tulee niin vähän auringon paistetta, ettei sen hyödyksi ottaminen juuri kannata. /1./

TAULUKKO 1. Auringonsäteilymäärät /2/

| Kaupunki | Leveyspiiri | kWh/m ² a |
|-----------|-------------|----------------------|
| Helsinki | 60°12'N | 938 |
| Jokioinen | 60°49'N | 887 |
| Sodankylä | 67°22'N | 807 |
| Lissabon | 38°43'N | 1689 |
| Rooma | 41°48'N | 1435 |
| Pariisi | 48°49'N | 1032 |
| Lontoo | 51°31'N | 1023 |
| Tukholma | 59°21'N | 993 |
| Pietari | 59°58'N | 908 |

3 AURINGON HYÖDYNTÄMINEN

3.1 Aurinkokeräimet

Auringon tuottamaa säteilyenergiaa on mahdollista hyödyntää kahdella eri tavalla, aktiivisesti tai passiivisesti. Aktiivinen hyödyntäminen on pääasiassa aurinkopaneelien tai aurinkokeräinten käyttöä. Aurinkopaneelilla voidaan tuottaa sähköä ja aurinkokeräimillä lämpöä. Passiivinen auringon hyödyntäminen tarkoittaa rakennuksen suunnittelussa auringonsäteilyn huomioimista rakenteita ja talon sijaintia valittaessa siten, että auringonsäteilystä saataisiin mahdollisimman paljon hyödynnetyksi ilman ulkopuolisia laitteita. Kesäisin taas passiiviseen hyödyntämiseen liittyen rakenteissa on otettava

huomioon auringonsäteilyn tuomat lämpökuormat. Kesällä rakennuksen sisälämpötilan nousua voidaan tehokkaasti estää mm. sälekaihtimilla

Yleisesti käytössä olevat aurinkokeräimet voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: tasokeräimiin ja tyhjiöputkikeräimiin. Keräimet muuttavat auringonsäteilyn ns. absorbaattorissa lämmöksi. Yleensä keräimessä kiertää jäätymätön vesi-glykoliseos. Neste lämpenee virratessaan keräimen lävitse. Lämmennyt neste kuljetetaan lämmönsiirtimeen, jossa se vapauttaa lämpöä nestevaraajaan. Jäähdytynyt neste kuljetetaan tämän jälkeen jäähtyneenä takaisin keräimeen ja kierto alkaa alusta.

Varaajaan siirrettyä lämpöä voidaan käyttää rakennuksen tai käyttöveden lämmitykseen. Aurinkokeräinten lämmittämän nesteen hyödyntämiseen on kehitetty myös jäähdyttimiä, joiden käyttövoimana toimii auringosta saatava lämpö.

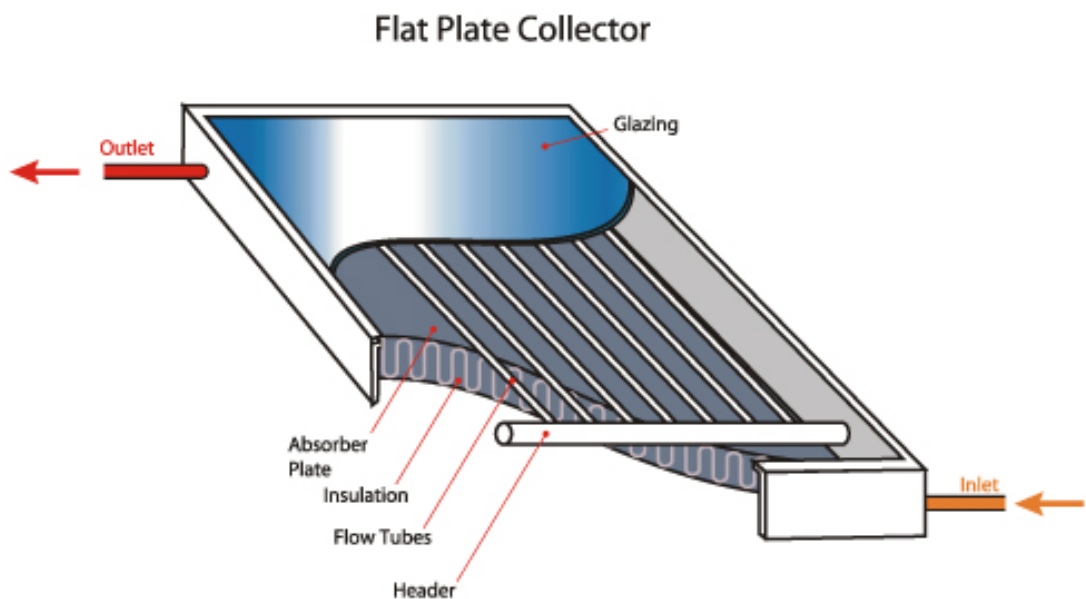
Aurinkokeräimet asennetaan usein rakennuksen katolle. Harjakattoisissa rakennuksissa keräimet voidaan asentaa suoraan katon linjaa (kuva 1). Tasakattoisissa rakennuksissa keräimet tulee asentaa telineisiin (kuva 25) oikean kallistuskulman aikaansaamiseksi.



KUVA 1. Tyhjiöputkikeräimet harjakatolla /3/

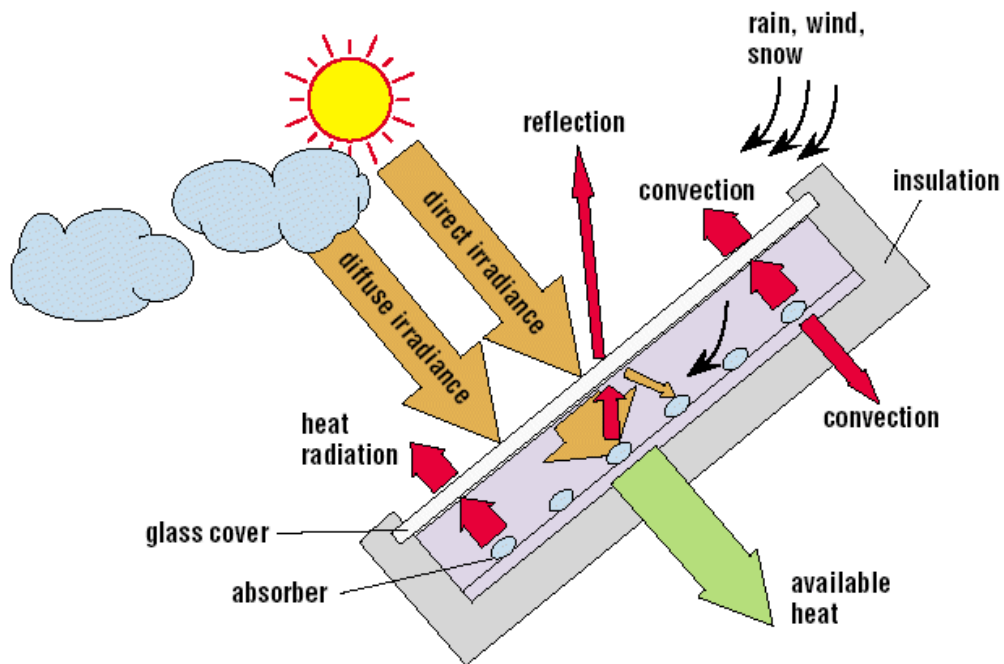
3.1.1 Tasokeräin

Tasokeräin koostuu (kuva 2) rungosta, putkista (flow tubes), keräinelementtistä eli absorbaattorista (absorber plate), eristyksistä (insulation) ja vähärautaisesta karkaistusta pintalasisista (glazing).



KUVA 2. Tasokeräimen rakenne /4/

Tasokeräimessä säteilyä kerätään tumman keräinelementin avulla (kuva 3 absorber). Elementin tumma pinta absorboi siihen kohdistuvasta auringon säteilystä (kuva 3 suora säteily (direct irradiance) ja hajasäteily (diffuse irradiance)) suuren osan ja kuumeenee. /2./ Jotta säteilyn hyödyntäminen saadaan vielä tehokkaammaksi, absorptiopinnalla on selektiivinen pinnoite ja se on katettu karkaistulla lasilla (kuva 3 glass cover). Sekä pinnoite että kate ottavat hyvin sisäänsä säteilyenergiaa auringonsäteilyn aallonpituuksilla, mutta estävät mustan absorptiolevyn lämpösäteilyä vuotamasta ulos (kuva 3 konvektio (convection) ja lämpösäteily (heat radiation)). /5./



KUVA 3. Keräimen energiavirrat /6/

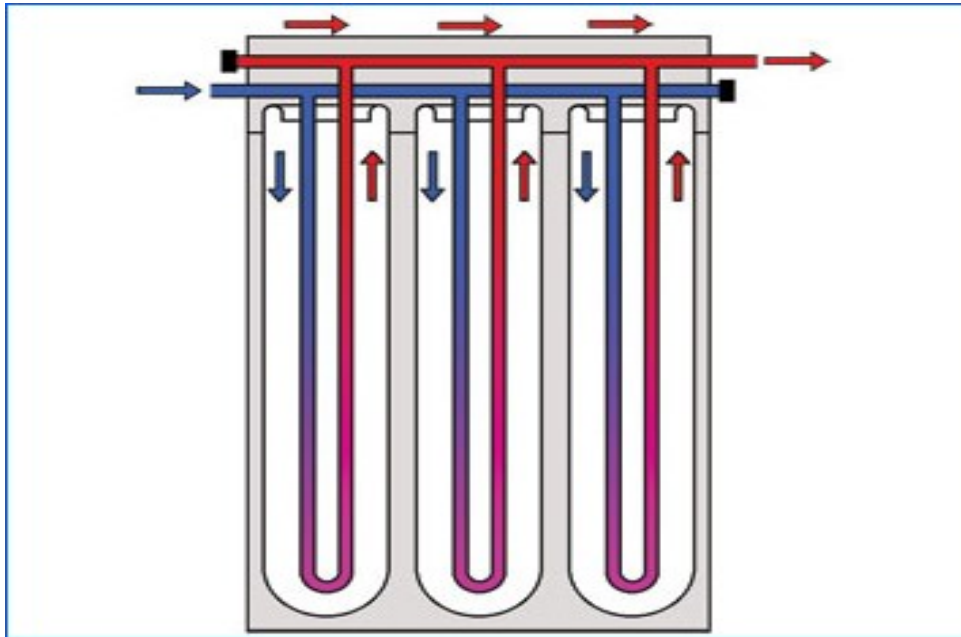
Keräinelementti on yleensä metallirakenteinen, mutta myös lämpöä kestäviä muoveja käytetään /2/. Yksikertaisimmillaan tasokeräin on pelkkä kupariputki, joka lämpenee auringonsäteilyssä. Keräimissä olevan lasin tehtävä on suojella absorbaattoria tuulelta (konvektio) ja lumelta. Suuri osa nykyisistä keräimistä on kupariputkistoja, joitten päälle on liitetty alumiinilevyt. Näillä keräimillä ei kuitenkaan päästä parhaaseen hyötysuhteeseen. Markkinoille on tullut koko alumiinisia keräimiä, jotka on valmistettu profiililevyistä, joiden sisällä neste virtaa. Näissä keräimissä on suurempi lämmönsiirtopinta-ala ja siten parempi hyötysuhde perinteisiin ratkaisuihin verrattessa.

Tasokeräimissä parhaat hyötysuhteet saavutetaan, kun keräimen ja ulkoilman välinen lämpötilaero on pieni. Lämmitysjärjestelmissä tulisikin käyttää mahdollisimman pieniä lämpötiloja. /2./ Tasokeräimien yksinkertaisen rakenteen vuoksi niiden käyttöaika on erittäin pitkä. Useimmat valmistajat myöntävät keräimilleen jopa 10 vuoden takuun. Keräimet soveltuvat siis varsin hyvin myös pohjoiseen ilmastoon vankan rakenteensa vuoksi.

3.1.2 Tyhjiöputkikeräin

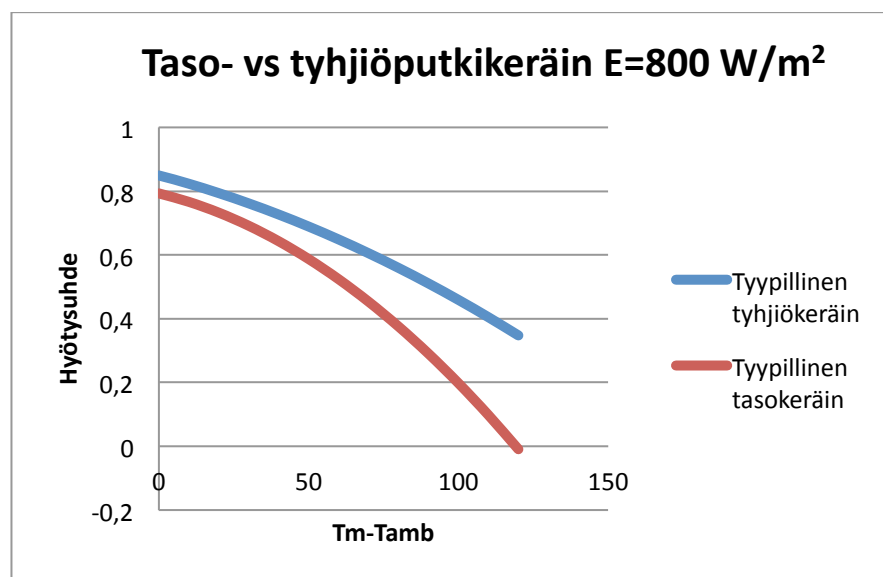
Tyhjiöputkessa neste lämpiää lasiputkissa, joiden ulkopinnalla on kahden lasin välinen tyhjiö. Tyhjiö on tehokas eriste, joka estää nesteeseen vangittua lämpöä karkaamasta.

Tyhjiöputki toimii kuin läpinäkyvä termospullo. Putkimaisen rakenteen ansiosta keräin ottaa säteilyä vastaan lähes joka suunnasta, toisin kuin tasokeräin. /6./



KUVA 4. Tyhjiöputkikeräimien toimintaperiaate /8/

Tyhjiöputkikeräimissä on tasokeräimiin verrattuna korkeilla lämpötilaeroilla parempi hyötysuhde. Ne sopivat paremmin käyttökohteisiin, joissa tarvitaan korkeampia lämpötiloja. Tyhjiöputkikeräimellä voidaan tuottaa 100°C vielä hyvällä hyötysuhteella, kun taas tasokeräimillä yleisesti yli 80°C lämpötilojen tuottaminen ei ole järkevää hyötysuhteen romahtaessa.



KUVA 5. Tyhjiöputki- ja tasokeräimen vertailu

Tyhjiöputkikeräimien huonona puolena voidaan pitää sen rakenteesta johtuen suhteellisen heikkoa kestävyyttä mekaaniselle rasitukselle. Keräimen lasi ja tyhjiö ovat helposti vaurioituvia osia. Huonona puolena voidaan myös pitää järjestelmän huoltoa, koska rikkoutunut tyhjiöputki on hankala havaita ja tällöin keräin voi pitkän ajan toimia huonolla hyötysuhteella menetetyn tyhjiön eristekyvyn takia. Suomessa keräimen pintaa saattaa muodostua myös jäätä, joka toimii peilin tavoin ja huonontaa hyötysuhdetta. Näistä syistä tasokeräimet ovat perinteisesti olleet suosituimpi keräintyyppi.

3.2 Keräinten sijoitus ja suuntaus

Aurinkokeräimen sijainti, kallistuskulma ja suuntaus vaikuttavat merkittävästi sen optimaaliseen toimintaan ja energiantuottoon /2/. Keräimet tulisi aina sijoittaa paikkaan, johon ei pääse muodostumaan varjoja. Varsinkin talvella, kun aurinko on Suomessa alhaalla ja varjot pitempiä kuin kesällä, keräinten sijainti vaikuttaa olennaisesti energiantuottoon. Mitä korkeammalla ja ylempänä sen parempi. /2./

Kiinteästi asennettava aurinkokeräimet suunnataan yleisesti etelään. Etelään suuntaamalla saada suurin kokonaistuotto keräimisestä. Jos edessä on esim. varjostava talo, voidaan järjestelmä suunnata myös itään tai länteen, mutta tällöin tuotto jää pienemmäksi kuin optimaalisella suuntauksella. Mikäli järjestelmän kulutushuippu on aamulla, järjestelmä kannattaa suunnata itään; länteen jos huippukuormitus illalla. /2./

Aurinkoenergiasta saadaan paras teho silloin, kun säteily tulee kohtisuoraan eli kun tulokulma on 0° . /2./ Paras kallistuskulma vuosituoton kannalta on Suomessa noin $40-50^\circ$. Jos pääosa energian tarpeesta on kesäaikaan, tulee kallistuskulman olla noin $30-40^\circ$. Talvikäyttöön kallistuskulman optimoinnissa ei ole Suomessa syytä, koska talvi-aikaan auringon säteily on pientä ja ulkolämpötila matala. Vähäisen säteilyn ja matalan lämpötilan takia koko järjestelmän hyötysuhde on huono talvi aikaan.

Aurinkokeräin kallistetaan aina vähintään 20° kulmaan, jotta keräin pystyy puhdistamaan itsensä vedestä ja lumesta. Pienen kallistuskulman yhteydessä keräimet eivät välttämättä puhdistu itsestään ja lika jää lasipinnalle. /1./

TAULUKKO 2. Säteily/vrk eri kallistuskulmilla, suuntaus Helsingissä etelään ilman varjostuksia (kWh/m²/päivä) /2/

| Kuukausi | 30° | 45° | 90° |
|-----------|-----|-----|-----|
| Tammikuu | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| Helmikuu | 1,5 | 1,8 | 1,9 |
| Maaliskuu | 3,1 | 3,4 | 3,2 |
| Huhtikuu | 4,4 | 4,5 | 3,4 |
| Toukokuu | 5,9 | 5,7 | 3,7 |
| Kesäkuu | 6,6 | 6,3 | 3,9 |
| Heinäkuu | 5,7 | 5,5 | 3,6 |
| Elokuu | 5 | 5 | 3,6 |
| Syyskuu | 3,3 | 3,5 | 3 |
| Lokakuu | 1,6 | 1,8 | 1,7 |
| Marraskuu | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Joulukuu | 0,4 | 0,5 | 0,6 |

4 AURINKOLÄMMITYS

Aurinkolämmityksen suurin ero perinteisiin lämmitysjärjestelmiin on aurinkolämmön jaksottainen saanti. Talvisin, kun lämmitystarve on suurin, auringon säteily on vähäistä ja kesäisin, kun aurinkoenergiaa on runsaasti käytettävissä, ei lämmitystarvetta juurikaan ole. Aurinkolämmitys tarvitsee aina rinnalle toisen lämmitysjärjestelmän, koska lämmön saanti on jaksollista. Tämä on syy, miksi Suomessa ei juurikaan ole rakennettu aurinkolämmityslaitteistoja.

Lämpimän käyttöveden tarve on rakennuksissa kuitenkin ympärivuotista ja sen lämmittämiseen tarvittavasta vuotuisesta energiasta on aurinkokeräimillä mahdollista saada jopa 60 %. Vesikiertoisella lattialämmityksellä varustetussa rakennuksessa, jossa käytetään aurinkoenergiaa lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden valmistukseen, voidaan vuoden lämmitysenergian tarpeesta saada aurinkokeräimillä katettua yli 30 % (kuva 6).

Suomessa auringon säteilyenergiaa saadaan hieman alle 1000 kWh/m² vuodessa. Tästä 30-40 % voidaan ottaa talteen aurinkolämpöjärjestelmällä, jolloin aurinkokeräimellä saadaan lämpöä keskimäärin 300-400 kWh/m² vuodessa. /8./

Kuvassa 6 on esimerkki kuvitteellisesta omakotitalosta, jossa on kolme asukasta. Talon vuosittainen lämmöntarve on 20 000 kWh. Aurinkoenergialla lämmitetään käyttövettä sekä rakennusta. Rakennuksen lämmitys tapahtuu lattialämmityksellä sen matalien lämpötilojen takia, jolloin saadaan suurin hyöty aurinkokeräimistä. Tämä simulatio on tehty Get Solar-ohjelmalla, jolla on mahdollista mallintaa aurinkolämmitysjärjestelmiä.

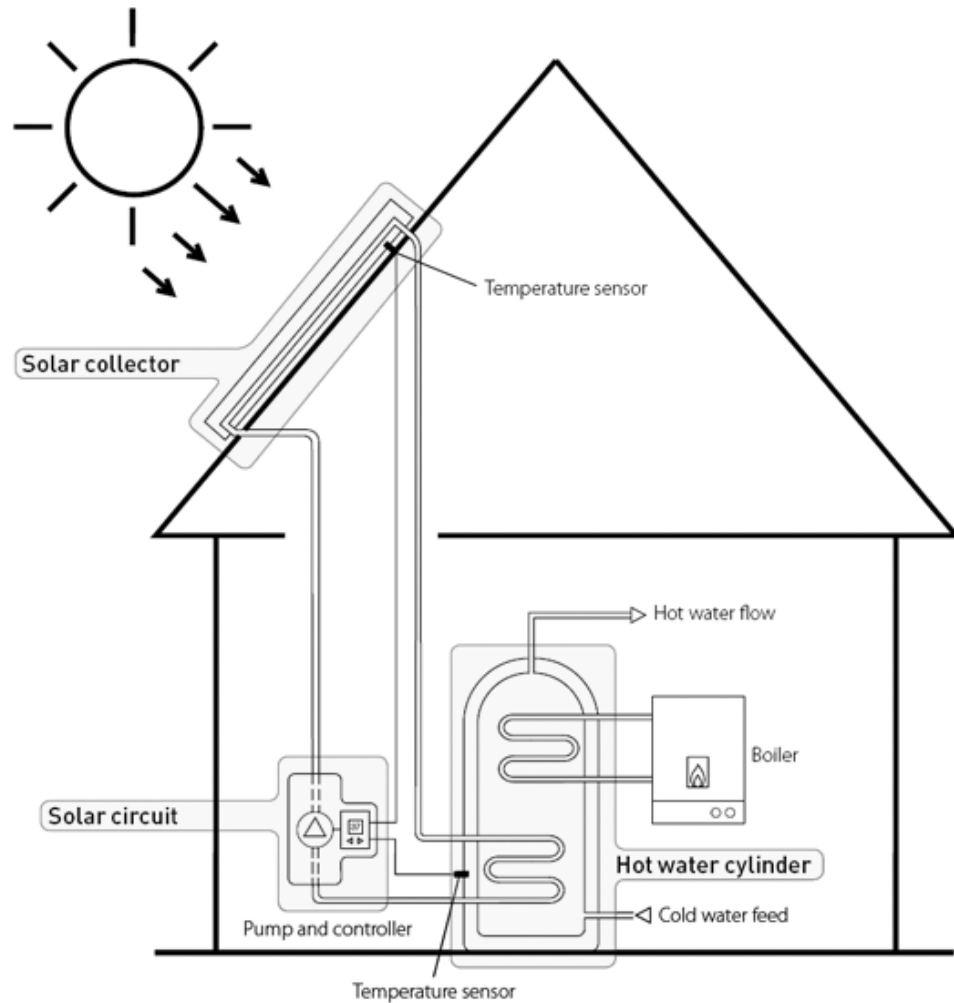
Kuvasta 6 huomataan, että kesäaikaan aurinkokeräimillä voidaan tuottaa käytännössä koko lämmityksen ja käyttöveden tarvitsema energia. Huhtikuu–elokuu välillä käyttöveden lämmittämiseen ei tarvita laisinkaan aurinkokeräimien ulkopuolista energiaa.

| | | | | | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|
| Project: | Savosolar | | | | | | |
| location: | Mikkeli | latitude: | 62.4° | | | | |
| Collector: | 20.00 m² | Savosolar SF-100-03 | | | | | |
| Characteristics: | eta0 = 0.910 | a1 = 2.305 W/(m²·K) | a2 = 0.0370 W/(m²·K²) | | | | |
| Mounting angle: | 40.0° | Azimuth: 0.0° | | | | | |
| System type: | Heating tank and fresh hot water (2) | | | | | | |
| heating water tank: | 1000 litres | temperature : max. 65°C | | | | | |
| | min. 63°C | | | | | | |
| fresh hot water system: | 20 litres/min at 10 -> 45°C and 55°C feed temp. | | | | | | |
| required energy: | 8.37 kWh/day = | 150 litres/day from 10°C to 58°C | | | | | |
| | 20.00 MWh/year heating energy | | | | | | |
| Solar heating: | at T amb. < 17°C | heating circuit: 45/30°C, 10 kW at -25°C | | | | | |
| Month | solar yield | Solar heating * | solar irradiation energy | back up energy | Solar fraction dhw | heating | efficiency |
| | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [%] | [%] |
| January: | 148 | 69 | 520 | 226 | 26 | 2 | 28 |
| February: | 496 | 298 | 1320 | 89 | 69 | 11 | 38 |
| March: | 816 | 577 | 2066 | 70 | 77 | 23 | 40 |
| April: | 1033 | 749 | 2782 | 19 | 94 | 40 | 37 |
| May: | 1072 | 762 | 3504 | 8 | 97 | 64 | 31 |
| June: | 817 | 509 | 3458 | 4 | 99 | 80 | 24 |
| July: | 664 | 341 | 3518 | 4 | 99 | 89 | 19 |
| August: | 730 | 415 | 3138 | 8 | 98 | 78 | 23 |
| September: | 627 | 372 | 1739 | 49 | 84 | 37 | 36 |
| October: | 533 | 319 | 1304 | 95 | 69 | 20 | 41 |
| November: | 132 | 64 | 388 | 226 | 23 | 3 | 34 |
| December: | 115 | 43 | 400 | 222 | 24 | 2 | 29 |
| Total: | 7183 | 4519 | 24136 | 1018 | 72 | 23 | 30 |
| factor of savings for sdhw and space heating: 30.3% | | | | | | | |
| specific annual collector yield: 359 kWh/m² | | | | | | | |

KUVA 6. Aurinkolämmityksen simulointi

4.1 Aurinkolämmitysjärjestelmät

Aurinkoenergian hyödyntämiseen tarvitaan aurinkolämmitysjärjestelmä, jolla saadaan kuljetettua kerättyä energiaa varastoon ja siitä hyödynnettävään kohteeseen tarpeen mukaan. Aurinkolämpöjärjestelmä koostuu useista komponenteista ja laitteista. Sen keskeisiä osajärjestelmiä ovat aurinkokeräin, varaaja, pumppuyksikkö, eristykset, yhdysputkisto, varolaitteet, lämmönvaihdin ja säätöyksikkö. /5./



KUVA 7. Aurinkolämpöjärjestelmän laitteet: keräimet (solar collector), lämminvesivaraaja (hot water cylinder), pumppuryhmä (pump and controller), nesteputkisto (solar circuit), lisälämmönlähde (boiler) /10/

4.2 Aurinkolämmitysjärjestelmän osat

4.2.1 Aurinkokeräimet

Aurinkokeräimiä valitessa on ensin tiedettävä käyttökohde, johon lämpöä tuotetaan. Aurinkokeräimiä voidaan käyttää hyväksi mm. uima-altaan lämmityksessä, rakennuksen lämmityksessä, käyttöveden lämmityksessä ja aurinkojäähdytyksessä. Näistä jokainen tarvitsee toimiakseen eri käyttölämpötilat, jotka voivat vaihtelevat 30-110°C välillä.

Lämpötilojen mukaan voidaan jakaa valinta kahteen kategoriaan: tasokeräimet < 70°C ja tyhjiöputkikeräimet > 70°C. Tämä on vain yleistys, koska molemmilla keräimillä päästään yleensä 30–100°C lämpötilatasoihin. Tapauksissa, joissa yleisesti käytetään matalia lämpötiloja, mutta välillä tarvitaan korkeitakin 90–110°C lämpötiloja, voidaan neste lämmittää tasokeräimissä 70°C lämpötilaan ja ohjata neste tämän jälkeen tyhjiöputkikeräimeen, jossa sitä tulistetaan 100°C lämpötila-asteeseen saakka.

Rakennuksen lämmityksessä menovedenlämpötilat vaihtelevat yleisesti 30-60°C välillä, joihin päästään vaivatta tasokeräimillä. Vanhoissa patteriverkostoissa saatetaan käyttää 70°C-asteista menovettä, jonka tuottamiseen tarvitaan keräimiltä yli 70°C lämpötilaa, jonka tuottamiseen tyhjiöputkikeräin sopii paremmin. Aurinkojäähdytyksessä käytettävät jäähdyttimet vaativat toimiakseen lämpötiloja väliltä 55–110°C. Näistä matalampia lämpötiloja käyttää adsorptiojäähdytin, jossa vaadittu lämpötila on 55–75°C välillä. Adsorptiojäähdyttimen kanssa tasokeräimet ovat hyvä valinta. Toinen jäähdytintyyppi on absorptiojäähdytin, joka vaatii 70–100°C välillä. Tämän jäähdyttimen kanssa käytettäväksi tyhjiöputkikeräimet sopivat paremmin.

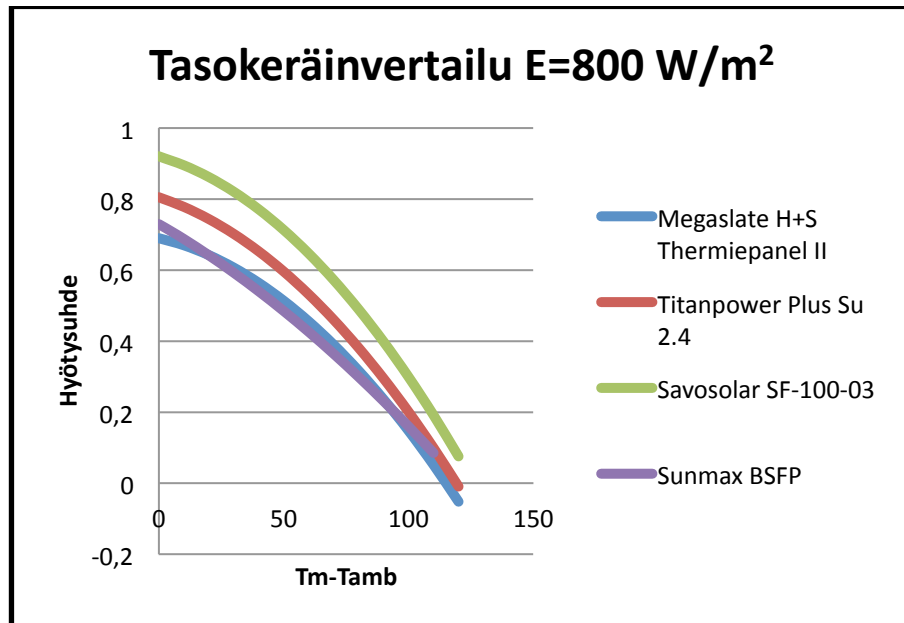
Aurinkokeräimen suorituskykyominaisuuksia voidaan tutkia hyötysuhdekuvaajan avulla. Kuvaajan perusteella on helppo valita paras keräin. Kerääjän hyötysuhteen määrittämiseen on olemaan standardi, joka mahdollistaa luotettavan tarkkailun eri keräinten välillä. Standardiolosuhteissa keräimiin kohdistuu vakio 800 W/m² auriongonsäteily, ja tämän avulla kerääjästä mitataan hyötysuhteet eri kuormituspisteissä. /10./ Keräimen hyötysuhde lasketaan kaavalla 1.

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta T}{E_e} - k_1 \frac{\Delta T^2}{E_e} \quad (1)$$

η on keräimen hyötysuhde

η_0 on optinen hyötysuhde

k_1 ja k_2 ovat lämmön läpäisykertoimia
 ΔT on keräimen- ja ulkolämpötilan erotus, K
 E_e on keräimeen tulevan säteilyn määrä, W/ m².



KUVA 8. Tasokeräimien vertailu

Kuvasta 8 huomataan, että perinteisellä kupariputkirakenteella olevin keräimien välillä ei ole hyötysuhteessa suurta eroa (Megaslate, Sunmax). Savosolarin alumiiniprofiilikeräimessä hyötysuhde on selvästi parempi koko käyttöalueella. Aurinkokeräimissä tapahtuu vielä siis kehitystä, ja tulevaisuudessa nähdään vieläkin paremman hyötysuhteen omaavia keräimiä.

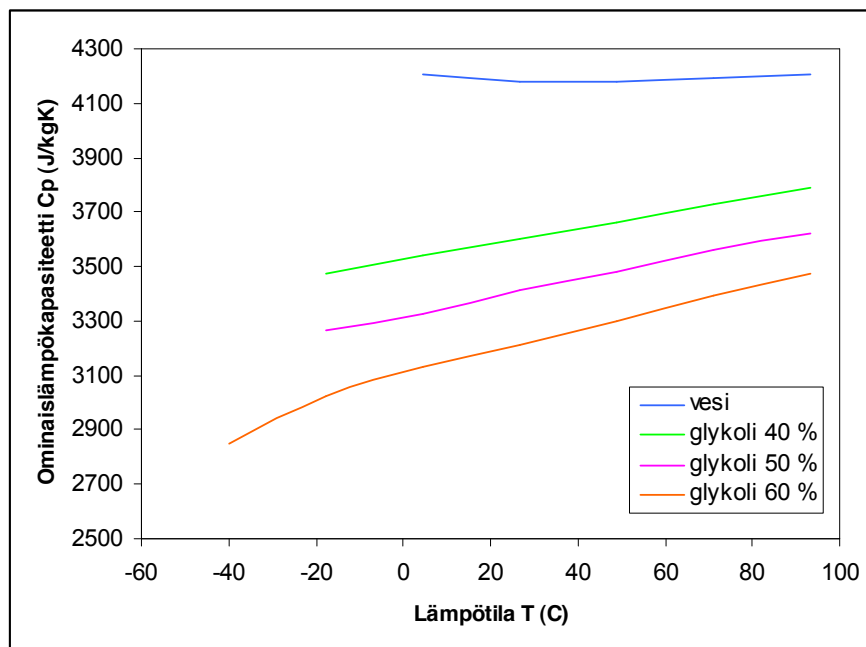
4.2.2 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimessa siirretään keräimissä nesteeseen sitoutunut lämpö varaajaan. Lämmönsiirrin tarvitaan, koska ympärivuotisessa käytössä olevissa keräimissä kiertää jäätymisvaaran takia vesi-glykoliseos, jota ei saa sekoittaa muun lämmitysjärjestelmän veteen. Lämmönvaihtimet toimivat siis nestepiirien erottimina. Syy, jonka takia koko lämmitysjärjestelmässä ei käytetä vesi- glykoliseosta, on glykolin kalliimpi hinta verrattuna vesijohtoverkoston veteen, glykolin pienempi ominaislämpökapasiteetti ja glykolin suurempi viskositeetti. Perinteisesti lämmönsiirrin on kuparikierukka, joka on sijoitettu varaajan sisään, jos lämmönsiirrin sijoitus ei ole mahdollista varaajan yhteyteen voidaan käyttää levylämmönsiirrintä.

Kierukan mitoitukseen tarvitaan lämmönsiirtoteho, varaajan lämpötila, keräimeltä tulevan nesteen lämpötila, keräimelle palaavan nesteen lämpötila ja virtaavan aineen tiedot. Nämä arvot annetaan lämmönsiirrinvalmistajalle, jolloin he voivat mitoittaa sopivan siirtimen käyttäen omia mitoitusohjelmiaan.

4.2.3 Lämmönsiirtoneste

Jäätymisvaaran takia kerääjissä kiertää vesi-propyleeniglykoli seos. Glykolin ja veden sekoitussuhteella muutetaan nesteen ominaisuuksia. Sekoitussuhde vaikuttaa jäätymispisteeseen, virtausvastuksiin viskositeetin muuttuessa ja virtaamiin ominaislämpökapasiteetin muuttuessa. Glykolissa on suhteessa veteen alhaisempi jäätymispiste, suurempi viskositeetti ja pienempi ominaislämpökapasiteetti. Nämä asiat tulee ottaa myös huomioon pumppuja ja nestelinjoja mitoittaessa. Yleisesti käytettävä glykolin sekoitusprosentti on 40-50% välillä, jolla päästään noin -30°C jäätymispisteeseen. Eri valmistajien glykolin ominaisuudet vaihtelevat, joten pakkasenkesto on tarkastettava aina tapauskohtaisesti.



KUVA 9. Glykolin seossuhteen vaikutus pakkasenkesto- ja ominaislämpökapasiteettiin /11/

4.2.4 Lämminvesivaraaja

Aurinkokeräimessä tuotettu lämpö varastoidaan hyvin eristettyyn lämminvesivaraajaan. Yleisimmin käytetty varastointitapa on siirtää lämpöä nesteen avulla veteen. Vedellä on suhteellisen hyvä lämpökapasiteetti, ja se on halpaa. Lisäksi vettä on perinteisesti käytetty lämmön siirtämiseen ja varastointiin. Yleensä aurinkolämmön varastointiin riittää yksi varaaja. Useimmissa järjestelmissä lämpöä siirretään varaajaan pakkasnestellä täytetyn kierukan avulla. Kierukka sijoitetaan säiliön alaosaan, jossa veden lämpötila on alhaisin. Tällöin säiliö lämpiää koko tilavuudeltaan. /12./

Suomessa käytetään yleisesti paineettomia (1,5 bar) akkuvaraajia, joissa on kaksi tai kolme kierukkaa. Näitä varaajia käytetään yleensä kiinteän polttoaineen ja vesikiertoisien lämmitysten yhteydessä. Akkuvaraajia kannattaa käyttää etenkin lattialämmitykseen, jonka myötä voidaan hyödyntää myös matalat paluulämpötilat (usein alle 30°C). /12./

Monissa lämpöjärjestelmissä talon lämmitystarve määrää varaajan koon. Esimerkiksi puukattilan tapauksessa varaaja on syytä mitoittaa siten, että kovallakin pakkasella riittää yksi päivittäinen lämmitys. Kolmella lämmönsiirtimellä varustetussa varaajassa alaosassa on aurinkokeräimen pinta-alan mukaan mitoitettu aurinkokierukka, keskivaiheilla käyttöveden esilämmityskierukka ja varaajan yläosassa käyttöveden viimeistelykierukka. Jotta ratkaisu toimisi optimaalisesti tulee käyttövesikierukoiden väliin vielä termostaattisekoittaja. /12./

4.2.5 Säätolaitteisto

Järjestelmän oikeista lämpötiloista ja virtaamista huolehtii säätöyksikkö. Järjestelmän ohjausyksikköön liitetty termostaatti säätää, miten pumppu käynnistyy ja pysähtyy. Termostaatin lämpötila-anturit ovat keräimissä ja lämminvesivaraajassa. Järjestelmä voi esimerkiksi olla säädetty niin, että pumppu käynnistyy ja lämmönsiirtoneste lähtee kiertämään, kun nesteen lämpötila aurinkokeräimissä on 5-10 °C korkeampi kuin lämpötila varaajan alaosassa. Kun aurinko ei enää lämmitä tarpeeksi ja nesteen lämpötila keräimissä laskee alle varaajan alemman asetuslämpötilan, pumppu pysähtyy. Ohjausyksikköön on myös asetettu varaajalle maksimilämpötila. Jos se ylittyy, pumppu pysähtyy jotta välttyttäisiin varaajan ylikuumenemiselta. /5./

4.2.6 Pumppuryhmä

Aurinkolämpöjärjestelmän nestepiirin kierron keskeinen osa on pumppuryhmä. Ohjausautomaatiolla ohjataan pumpun käyntiä ja virtaamaan tarpeen mukaan. Pumppuryhmään kuuluva kiertovesipumpun koko riippuu nestepiiri painehäviöistä ja virtaamasta. Pumpun tulee olla ohjattavissa (on/off). Nestepiirissä, jossa käytetään nesteenä jotain muuta kuin vettä, tulee pumpattavan aineen ominaisuudet ottaa huomioon mitoituksessa.

Kiertovesipumput ovat perinteisesti olleet kaksi- tai kolmenopeuksisia. Nämä pumput eivät ole kuitenkaan energiatehokkaita. Pumppujen energiatehokkuutta voidaan parantaa valitsemalla pumppu, jossa on sisäinen taajuusmuuntaja tai ohjaamalla vakionopeuspumppua taajuusmuuntajalla, koska aurinkolämmityskohteissa harvoin pystytään käyttämään vakiovirtaamaa.

4.2.7 Varolaitteisto

Nesteen tilavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa lämpölaajenemisen takia. Tilavuuden muutoksia kompensoimaan tarvitaan paisunta-astia, jolla saadaan paine pysymään haluttuna järjestelmässä. Paisunta-astian mitoittamiseen tarvitaan säiliön esipaine, järjestelmän nestetilavuuden muutos sekä paisunta-astin ja nestepiirin korkeimman osan korkeusero. Toimintahäiriöiden takia suljettu nestejärjestelmä pitää aina varustaa varoventtiilillä. Venttiili avautuu tietyssä paineessa, joka aina alhaisempi kuin järjestelmän suurin sallittu paine. Varoventtiili valitaan sen ulospuhallustehon mukaan. Ulospuhallusteho tulee olla suurempi kuin lämmitysjärjestelmän teho.

Yksisuuntaventtiili tarvitaan estämään vesikierto aurinkokeräinpiirissä väärään suuntaan, kun pumppu ei pyöri. Ilmanpoistiventtiilejä asennetaan aurinkolämpöjärjestelmän korkeimpiin kohtiin, jotta putkistossa mahdollisesti oleva ilma saadaan poistettua. Jos ilmaa jää linjoihin, ei haluttuihin virtauksiin useinkaan päästä. Tämän takia myös linjojen suunnitteluun tulee käyttää aikaa. Nestelinjat rakennetaan siten, että linjoissa on aina pieni nousu, jotta ilma kerääntyisi korkeimpaan kohtaa ja ilmanpoistajiin. /13./

5 RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS

Viihtymysvaatimuksien kasvaessa jäähdytyksen tarve lisääntyy rakennuksissa. Viihtyvyyden parantamisen on myös havaittu nostavan työtehoa. Edellä mainittujen lisäksi jäähdytystä tarvitaan teollisuudessa erilaisiin prosesseihin. /14./

Suomessa jäähdytystarve painottuu yleisesti rakennuksissa kesäaikaan. Yleensä jäähdytyskausi alkaa toukokuun lopulla ja kestää elokuun alkuun asti. Rakennuksissa, joissa on paljon sisäisiä lämpökuormia, kuten ihmisiä, tietokoneita ja muita koneita, voi jäähdytystarve olla ympärivuotista. Ympärivuotisesta jäähdytystarpeesta iso osa voidaan kattaa talvisin vapaajäähdytyksellä viilentämällä huoneita ulkoilmalla tai ulkoilman jäähdyttämällä nesteellä, mutta kesällä tarvitaan jäähdytinlaitteisto.

5.1 Rakennusten jäähdytysjärjestelmät

Yleisimmät käytössä olevat jäähdytyslaitteet ovat kompressorikoneita, joiden toiminta perustuu sopivan väliaineen eli kylmäaineen höyrystämiseen, puristamiseen kompressorilla ja lauhduttamiseen. Kompressorijäähdyttimet toimivat sähköenergialla ja osan niissä käytettävistä kylmäaineista on voimakkaasti ympäristölle haitallisia. /14./ Kompressorijäähdyttimet ovat hankintahinnaltaan edullisempia adsorptio- ja absorptiojäähdyttimiin verrattuna. Kompressorijäähdyttimet vaativat kuitenkin usein säännöllistä huoltoa käyttämänsä ilmakehälle haitallisen kylmäaineen vuoksi.

Ympäristötietoisuuden lisääntyessä on kompressorijäähdytyksen rinnalle on ruvettu etsimään vaihtoehtoja. Itse kompressorijäähdytin pystyy tuottamaan yhden kW sähköteholla noin 2-3 kW jäähdytystehoa. Tutkimusten mukaan tästä tuotetusta jäähdytysenergiasta saadaan käyttöön vain noin kolmasosa, joten sähköllä jäähdyttäminen ei ole energiatehokasta.

Kylmälaitteiden ”hyvyyttä” vertaillaan usein ns kylmäkertoimen avulla. Kylmäkertoimesta käytetään usein lyhennettä COP. Kylmäkeroi eli COP arvo lasketaan kaavalla 2.

$$COP = \frac{Q_s}{Q_t} \quad (2)$$

| | |
|----------------|---------------------------|
| COP | on kylmäkerroin |
| Q _s | on saatu jäähdytysenergia |
| Q _t | on tuotu energiamäärä. |

Jäähdytysprosessi voidaan tuottaa sähkö- tai lämpöenergialla. Sähköä käytettäessä hyötysuhteena käytetään COP_{sähkö} lyhennettä ja lämpöenergialla COP_{lämpö} lyhennettä.

Kompressorijäähdytyksen yksi korvaaja saattaa olla lämpöavusteiset kylmäkoneet. Varsinkin kasvava kiinnostus matalalämpötilaisia lämpöenergiaa hyödyntäviä jäähdytyslaitteistoja (<100°C) kohtaan on johtanut lisääntyneeseen tutkimustyöhön ja uusien mahdollisuuksien etsimiseen. Yleinen lämmönlähde on prosesseista syntyvä hukkalämpö. Tämä hukkalämpö on yleensä 60-100°C välillä. /15./

Toinen mielenkiintoinen lämmönlähde termiseen jäähdytykseen on aurinkokeräimet. Aurinkoavusteinen jäähdyttäminen on mahdollista adsorptio- tai absorptiojäähdytystekniikalla. Aurinkokeräimillä ja termisellä jäähdyttimellä saadaan teknisesti yksinkertainen ja energiaa säästävä ratkaisu. /15./

5.2 Aurinkojäähdytys

Aurinkojäähdytys on siis lämpöenergialla jäähdyttämistä. Näitä jäähdyttimiä on kahta tyyppiä: absorptio- ja adsorptiojäähdytin. Molemmat jäähdyttimet perustuvat lämpöenergian avulla tapahtuvaan faasimuutokseen, rakenteeltaan jäähdyttimet ovat kuitenkin hyvin erilaisia. Absorptio- ja adsorptiojäähdyttimet voidaan jakaa vielä niiden käyttämien kylmäaineparien mukaan. Termisten jäähdyttimien kehitys on alkanut ammoniakki - vesi - absorptiojäähdyttimestä. Nyt zeoliitti - vesi - adsorptiojäähdyttimet ovat tulossa markkinoille.

Jäähdytintyypeistä absorptiojäähdyttimet tarvitsevat toimiakseen korkeita 75-120°C lämpötiloja, adsorptiojäähdyttimellä puolestaan päästään hyviin hyötysuhteisiin jo 55-70°C lukemissa. Adsorptio- ja absorptiojäähdyttimet eivät ole aikaisemmin olleet kil-

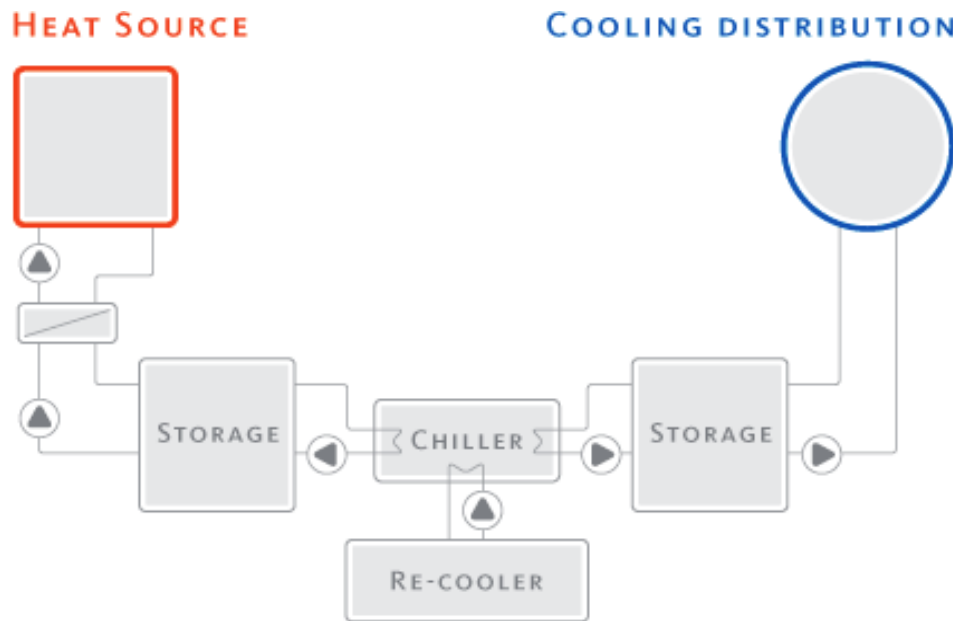
pailukykyisiä kompressorijäähdyttimien kanssa sähköenergian edullisuuden ja CFC-kylmäaineiden suosion takia. CFC-kylmäaineiden kiellon, sähköenergian hinnan nousu ja kasvava ympäristötietoisuus ovat kasvattaneet kiinnostusta energiaa säästäviä ja energiatehokkaita vaihtoehtoja kohtaan. /14./

Aurinkokeräimet yhdistettynä absorptio- tai adsorptiojäähdytimeen on ideaalinen työpari varsinkin rakennusten jäähdyttämisessä. Auringon lämmittäessä rakennusta saadaan samaan aikaan suuri määrä energiaa jäähdyttimen käyttöä varten. Taivaalta tuleva energia on ilmaista, jos käytössä on jo aurinkojäähdytysjärjestelmä. Sähköä kuluu vain pumppuihin ja automatiikkaan. Aurinkojäähdytyslaitoksissa 1 kW jäähdytystehon tuottamiseen ja siirtämiseen tarvitaan sähköä noin 0,1-0,2 kW, eli 10-20 % tuotetusta kylmästä. Kompressorijäähdytystä vertaillessa tämä tarkoittaisi, että aurinkojäähdytyksen $COP_{\text{sähkö}}$ on 5 ja kompressorijäähdyttimen $COP_{\text{sähkö}}$ on noin 2,5. Aurinkojäähdytyksen energiatehokkuus on siis kaksinkertainen kompressorijäähdytykseen verrattuna.

Suomessa aurinkojäähdytysjärjestelmällä yhdistettynä vapaajäähdytykseen pystytään jäähdyttämään ympärivuotisesti. Suuri osa rakennuksista ei vaadi ympärivuotista jäähdytystä, ja tällöin vapaajäähdytyksen rakentaminen on kannattamatonta. Pelkällä aurinkojäähdytyksellä voidaan yleisesti jäähdyttää maaliskuusta syyskuun alkuun.

5.3 Aurinkojäähdytysjärjestelmät

Aurinkojäähdytysjärjestelmään kuuluu aurinkolämmitysjärjestelmän lisäksi absorptio- tai adsorptiojäähdytin, nesteen jäähdytin, kylmävaraaja ja rakennuksen jäähdytyspiiri. Laitteiden mitoitus perustuu rakennuksen jäähdytysenergiantarpeeseen sekä suurimpaan jäähdytystehoon. Tehot saadaan laskettua simulointiohjelmilla, jonka perusteella voidaan valita riittävä jäähdytin ja muut komponentit sen ympärille. Jäähdytintä ei valita pelkästään huipputehon perusteella, koska huipputeho on lyhytaikaista ja järjestelmässä on kylmävaraaja tasaamassa huipputehontarvetta.



KUVA 10. Aurinkojäähdytysjärjestelmän osat /16/

5.3.1 Keräimet aurinkojäähdytyksessä

Aurinkojäähdytysjärjestelmissä on tärkeää valita sopiva aurinkokeräintyyppi, joka parhaiten sopii jäähdyttimen tarvitsemille lämpötiloille. Yleisesti järjestelmät, joilla on korkeampi $COP_{lämpö}$, tarvitsevat korkeampia toimintalämpötiloja. Tavallisen tasokeräimen hyötysuhde tippuu jyrkästi, kun lämpötila keräimessä nousee. Tämän takia ne sopivat käytettäväksi pääasiassa adsorptiojäähdytyskoneen kanssa, jotka toimivat jo noin 65°C tulolämpötiloilla. Kaikki muut jäähdytysprosessit vaativat yleensä tulolämpötilaksi yli 75°C . Korkeita lämpötiloja voidaan tuottaa kehittämällä tasokeräimiä (heijastamattomia pinnoituksilla tai tuplalaseilla) tai käyttämällä tyhjiöputkikeräimiä. /17./

Adsorptio- ja absorptiojäähdyttimet tarvitsevat keräinpinta-alaa vähintään noin $2\text{--}5 \text{ m}^2/\text{kW}$. Keräinpinta-alan määrä on määritelty kompromissiksi säteilyn saannin ja investointikustannuksien välillä. Kuitenkin tarkka keräinpinta-ala riippuu sijoituspaikasta sekä käyttölämpötiloista ja siten on osa järjestelmän suunnittelua. /17./ Keräinpinta-ala voidaan laskea myös kaavalla 3. /18./

$$A_K = \frac{1}{G_S * \eta_k * COP_j} \quad (3)$$

A_k on keräinpinta-ala, $\text{m}^2/\text{jäähdytys kW}$

| | |
|----------------|------------------------------------|
| G_s | on säteilyn määrä, kW/m^2 |
| η | on keräimen hyötysuhde |
| COP_j | on jäähdyttimen hyötysuhde. |

5.3.2 Jäähdyttimen valinta

Nykyään adsorptiojäähdyttimillä on parempi hyötysuhde matalilla lämpötiloilla kuin absorptiojäähdyttimillä. Adsorptiojäähdyttimet ovat kuitenkin kalliimpia absorptiojäähdyttimiin verrattuna, kun verrataan €/kW-suhdetta. Tällä hetkellä ongelma aurinkojäähdyttimissä on pieni jäähdytinvalmistajien lukumäärä, joka pitää hinnat korkeilla ja valintamahdollisuuden vähäisinä. Yleisesti eri jäähdyttimien $\text{COP}_{\text{lämpö}}$ -arvot liikkuvat 0,55 ja 0,65 välillä optimilämpötiloissa. /17./

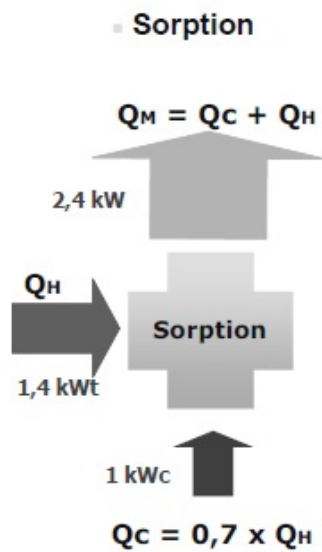
Jäähdytintä valittaessa pitää huomioida jäähdytinlaitteiston elinkaarikustannukset. Halvemmissa jäähdyttimissä on yleisesti pienempi $\text{COP}_{\text{lämpö}}$ -arvo. Jäähdyttimen $\text{COP}_{\text{lämpö}}$ -arvon laskiessa koko muun laitteiston virtaamat kasvavat, koska sama jäähdytystehon tuottamiseen tarvitaan tällöin enemmän kerääjiä, isommat putkilinjat, enemmän pumppausenergiaa ja suuremmat lämmönsiirtimet. Valinnassa pitää muistaa ottaa huomioon myös jäähdyttimen toiminta muissakin lämpötiloissa kuin mitoitusilanteessa. Huonoissa jäähdyttimissä $\text{COP}_{\text{lämpö}}$ muuttuu huomattavasti käyttölämpötilojen muuttuessa. Aurinkojäähdytyksessä paras jäähdytin on siis jäähdytin, jolla on suurin $\text{COP}_{\text{lämpö}}$, pienimmät toimintalämpötilat ja mahdollisimman tasainen toiminta eri käyttölämpötiloissa.

5.3.3 Kylmävarasto

Kun jäähdytysjärjestelmää käytetään pääasiassa päivä aikaan, ei suurta kylmävaraajaa tarvita. Mitä enemmän käyttö painottuu ilta-aikaan, sitä isompi varaaja tarvitaan. Varaajan kokoon vaikuttaa myös, mitoitetaanko jäähdytin koko vai osateholle. Osateholle mitoitettaessa varaajan koko tulee olla tarpeeksi suuri, jotta siihen voidaan ladata kylmäenergiaa tarpeeksi huippukulutuksen ajaksi. /19./

5.3.4 Välijäähdytyspiiri

Välijäähdytyspiirillä on suuri vaikutus jäähdyttimestä saatavaan tehoon ja jäähdyttimen hyötysuhteeseen. Useat järjestelmät Euroopassa käyttävät nesteen jäähdyttämiseen ilmajäähdyttimiä. Puhallinjäähdyttimien tehoa voidaan nostaa suihkuttamalla vettä jäähdyttimeen. Nestesuihkutuksella varustetuissa jäähdyttimissä voidaan päästä lämpötiloissa jopa alle ulkolämpötilan. Tehokkaissa ilmajäähdyttimissä puhaltimia ohjataan portaattomasti automatiikalla jäähdytystarpeen mukaan. /17./ Välijäähdytyspiirin tarvitsema jäädytysteho saadaan laskemalla yhteen jäähdyttimen jäähdytysteho ja sen tarvitsema lämmitysteho.



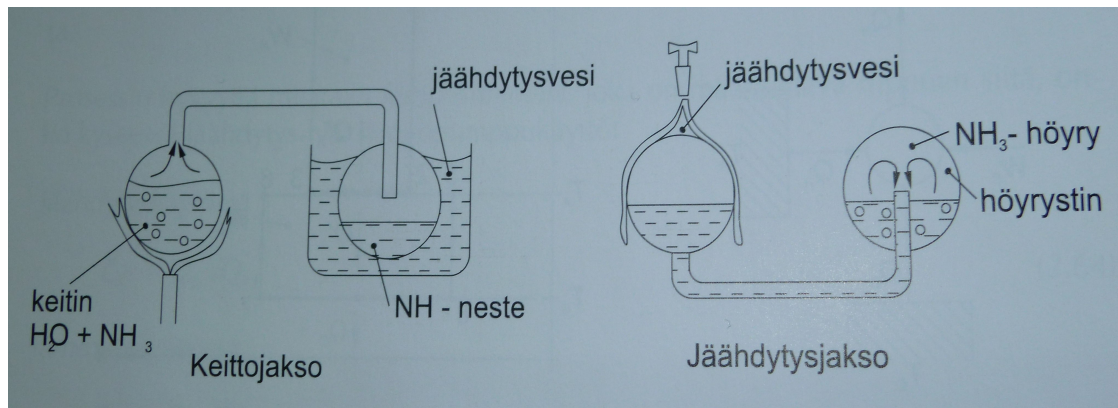
KUVA 11. Välijäähdytyspiirin teho /20/

6 ABSORPTIO JA ADSORPTIO

6.1 Absorptiojäähdyttimen toiminta

Absorptio tarkoittaa kaasun imeytymistä nesteeseen. Käänteinen prosessi eli desorptio tarkoittaa kaasun erottamista nesteestä. Absorptiota voi verrata lauhtumiseen, koska se on lämpöä vapauttava reaktio. Desorptio taas on lämpöä sitova reaktio. /14./ Käytetyissä absorptioprosesseissa työpareja on kaksi: vesi-ammoniakki ja vesi-litiumbromidi. Eri työainepareilla saadaan eli toimintapisteet aineiden ominaisuuksien mukaan.

Yksinkertaistettu absorptiokoneisto toimii kahdessa jaksossa (kuva 12). Keittojaksossa höyrystetään vesi/ammoniakki- liuksesta ammoniakkia, joka lauhdutetaan toisessa astiassa jäähdyttämällä. Jäähdytysjaksossa laite käännetään, kun keitinastiaa jäähdytetään vedellä, suurenee liuoksen tasapainopitoisuus ja ammoniakkihöyry alkaa liueta veteen. Vapautuva liukenemislämpö poistuu jäähdytysveteen. Kun lämpötila liuoksessa laskee, paine pienenee ja ammoniakki toisessa säiliössä alkaa höyrystyä. Höyrystyvällä ammoniakilla voidaan tehdä esimerkiksi jäätä. /21./



KUVA 12. Absorptiolaitteiston toiminta /21/

6.2 Absorptiojäähdyttimet

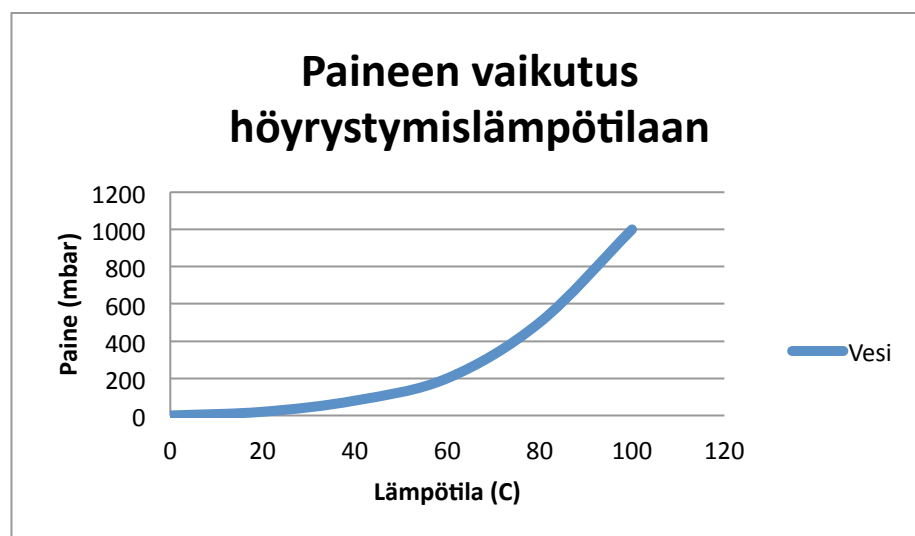
Absorptiojäähdyttimiä löytyy monenkokoisia, pienistä alle 10 kW laitteista aina suuriin yli 100 kW laitteisiin. Tyypillisesti absorptiojäähdytin tarvitsee toimiakseen lämmönlähteen 80-180°C välillä. Markkinoille on tullut myös uusia jäähdyttimiä, jotka toimivat noin 60°C lämpötiloista asti. Matalissa lämpötiloissa toimivien jäähdyttimien $COP_{lämpö}$ on usein huono, joten 80°C on suosituslämpötila. Korkealämpöisen energiantakia absorptiojäähdyttimen yhteydessä tyhjiöputkikeräimet toimivat tasokeräimiä paremmin. Suunnittelulämpötiloissa toimivan jäähdyttimen $COP_{lämpö}$ on yleensä noin 0,6-0,75. /22./

6.3 Adsorptiojäähdyttimen toiminta

Kiinteän aineen kykyyn imeä toisen aineen höyryä voidaan perustaa lämmöllä toimiva prosessi. Adsorptio on kaasun sitoutumista kiinteän aineen pintaan. Koska sitoutuva määrä/pinta-ala ei voi olla suuri, tarvitaan aineita, jotka sisältävät hyvin suuren pinta-

alan tilavuutta kohti. Tällaisia ovat ns. mikrohuukoiset aineet, tavallisimpana aktiivihiili, zeoliitit ja silikageeli (pinta-ala jopa $800\text{m}^2/\text{g}$). Kuten absorptiossa, riippuu adsorboituva määrä kaasunpaineesta ja lämpötilasta. Erona absorptiokoneistoon on, että kiinteän adsorptioaineen eli sorbentin takia prosessiossa on tehtävä jaksollisesti toimiva. /21./

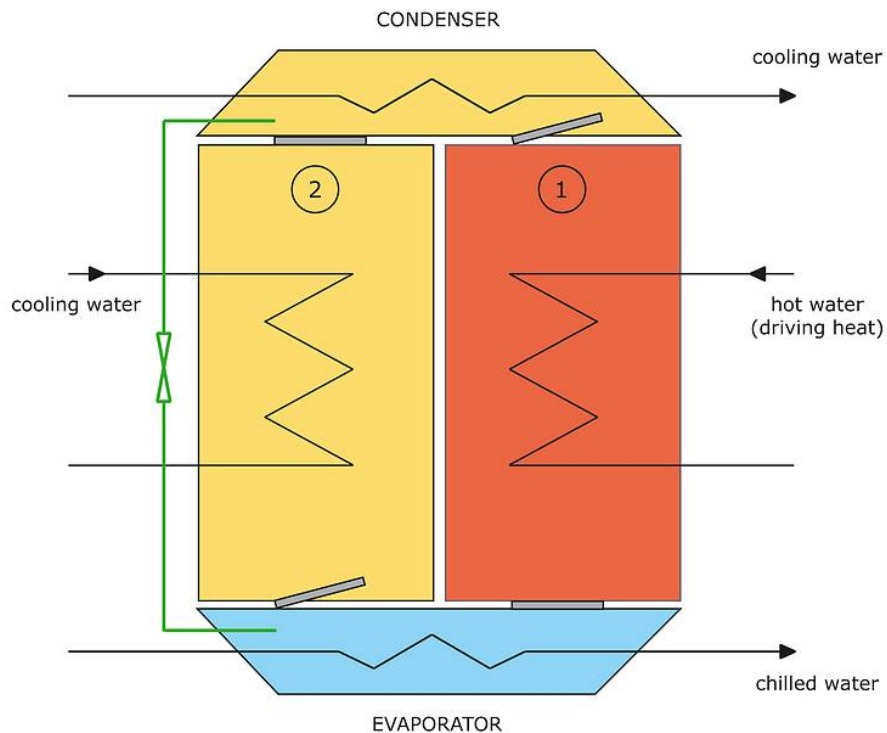
Adsorptiojäähdyttimissä käytetään kylmäaineena vettä. Vesi höyrystyy huoneenlämmössä, jos paine on tarpeeksi matala (noin 20 mbar 20°C). Höyrystyessään vesi imee lämpöä ympäristöstään ja tähän perustuu jäähdytysprosessi. Jatkuvan adsorptioprosessin takaamiseksi käytettävältä materiaalilta vaaditaan tiettyjä ominaisuuksia; sen tulee helposti adsorboida itseensä vettä, materiaalissa ei saa tapahtua rakennemuutoksia tai suurta lämpölaajenemista ja materiaalin pitää luovuttaa helposti neste itsestään. Vesi kiehuu ilmakehän paineessa 100°C , jäähdyttimen matalin toimintalämpötila riippuu siis laitteen sisäisestä paineesta 100 mbar:in paineessa päästään noin $50\text{--}55^\circ\text{C}$ (kuva 13) toimintalämpötilaan. /23./



KUVA 13. Veden höyrystyslämpötilat

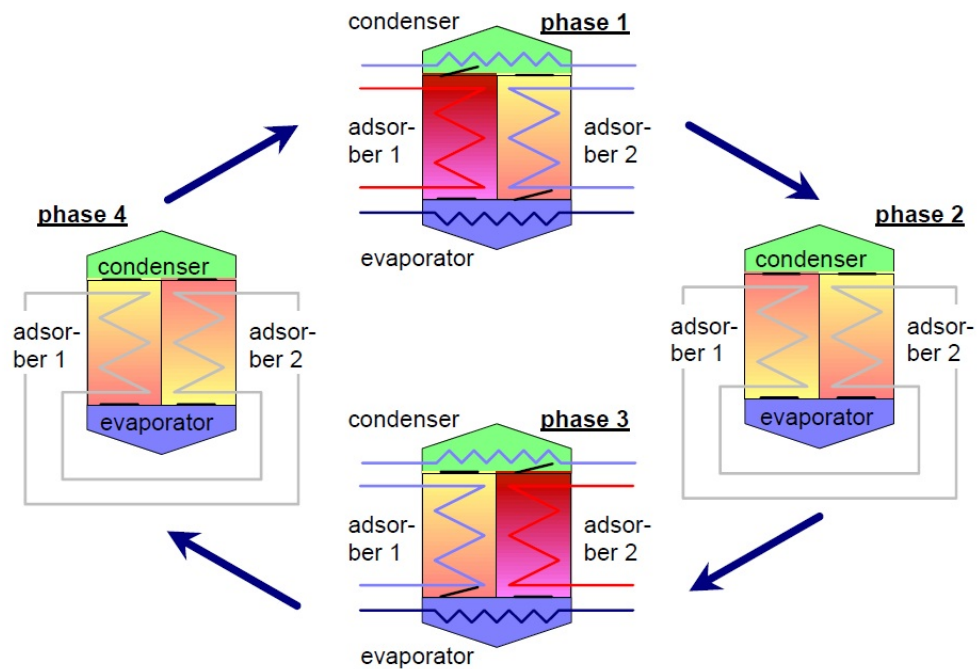
Adsorptiojäähdytin sisältää neljä pääkomponenttia, kaksi kammiota, joissa on adsorboivaa materiaalia sekä höyrystimen ja lauhduttimen. Adsorptiojäähdyttimen toimies-
sa sen sisällä tapahtuu neljä eri prosessia (kuva 14). 1. Aine, joka on aikaisemmin adsorboitunut toiseen adsorberiin höyrystetään pois käyttämällä lämpöä (kuva 14 kam-
mio 1). 2. Höyry lauhtuu lauhduttimessa, lauhduttimen lämpö kuljetetaan pois jäähdyttävän veden avulla (kuva 14 condenser). 3. Lauhtunut neste ohjataan höyrystimeen, siellä se höyrystyy matalassa paineessa (kuva 14 evaporator). Tämä vaihe tuottaa

jäähdyttimen kylmätehon. 4. Kylmäaine höyry adsorboituu adsorberiin, lämpöä poistetaan samalla jäähdyttävällä vedellä (kuva 14 kammio 2). /24./



KUVA 14. Adsorptiojäähdytin /24/

Adsorptiojäähdyttimet toimivat neljässä vaiheessa rakenteensa takia. Kun oikea kammio on sitonut koko kapasiteettinsa ja vasen kammio luovuttanut koko sitomansa kapasiteetin, kammioden toiminnot vaihdetaan keskenään. Toiminnan vaihdon välissä kammiot usein yhdistetään joksikin aikaa, jolloin lämpötilat eri kammioden välillä tasoittuvat. Tämä vaihe parantaa jäähdyttimen energiatehokkuutta, koska kuuma ja kylmä kammio pitää kuitenkin viilentää/kuumentaa ennen seuraavaa vaihetta. Tällä tavoin toimiva jäähdytyskone mahdollistaa jatkuvan jäähdytystehon, koska toisessa kammiossa tapahtuu aina veden sitomisprosessi. Koko neljävaiheinen prosessi on esitetty kuvassa 15. Yleisesti adsorptiojäähdyttimissä yksi jakso kestää noin 6-7 minuuttia. Vajaateholla toimiessaan jaksojen pituutta voidaan kasvattaa ja näin parantaa laitteen hyötysuhdetta.



KUVA 15. Adsorptiojäähdyttimen vaiheet /24/

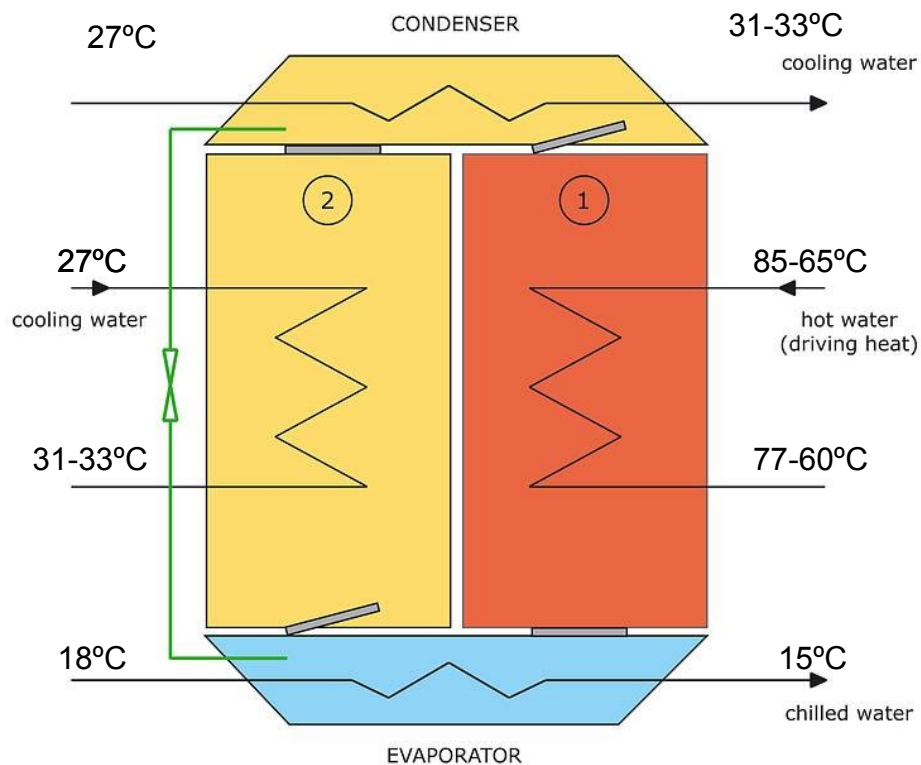
6.3.1 Adsorptiojäähdyttimet

Adsorptiojäähdyttimeä löytyy markkinoilta pienistä alle 10 kW jäähdyttimistä suuriin yli 100 kW jäähdyttimiin. Jäähdyttimistä voidaan tehdä jakoa työparin tai käyttölämpötilojen mukaan. Työpareja on käytännössä vain kaksi: vesi- silikageeli ja vesi- zeoliitti. Näistä silikageelijäähdyttimet ovat perinteisempiä ja zeoliitti on tulossa vasta markkinoille. Toinen jako jäähdyttimissä voidaan tehdä käyttölämpötilojen perusteella. Keski- ja Pohjois-Eurooppaan sopivat 55-75°C lämpötiloja käyttävät jäähdyttimet ja lämpimämpiin ilmastoihin sopivat 80-100°C lämpötiloja käyttävät jäähdyttimet.

Matala- ja korkealämpötilajäähdyttimien suunnittelussa suurin ero on välijäähdytyspiirin lämpötilat. Matalalämpöjäähdyttimissä pyritään 20-30°C välijäähdytyslämpötiloihin ja korkealämpöjäähdyttimissä 30-40°C lämpötiloihin. Maantieteellinen sijainti vaikuttaa suuresti välijäähdytyspiirin mitoittaviin lämpötiloihin. Karkeasti mitoittava välijäähdytyslämpötila on päivän jäähdytysajan lämpötila lisättynä 2-4 asteella.

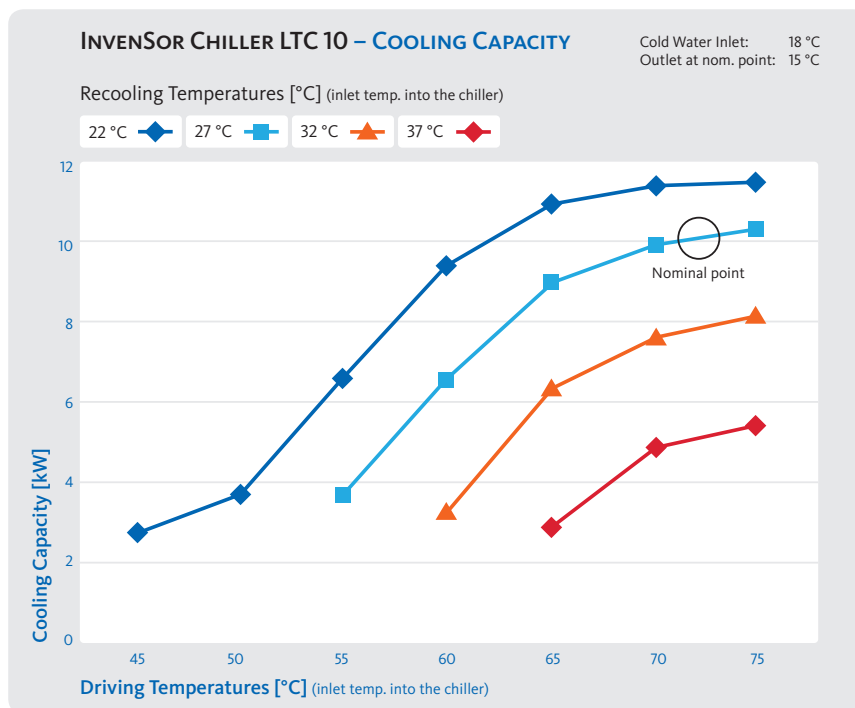
TAULUKKO 3. Pienien adsorptiojäähdyttimien vertailu

| Valmistaja | InvenSor | InvenSor | InverSor | SorTech | SorTech |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|
| Malli | HTC 10 | LTC 07 | LTC 09 | ACS 08 | ACS 15 |
| Toimintapari | Zeoliitti/vesi | Zeoliitti/vesi | Zeoliitti/vesi | Silika/vesi | Silika/vesi |
| Kylmäteho (kW) | 10 | 7 | 9 | 8 | 15 |
| COP | 0,5 | 0,54 | 0,61 | 0,6 | 0,6 |
| Käyttölämpötilat (°C) | 85/77 | 65/60 | 72/66 | 72/65 | 72/65 |
| Lauhdutuslämpötila (°C) | 27/33 | 27/31 | 27/32 | 27/32 | 27/32 |
| Jäähdytyslämpötila (°C) | 18/15 | 18/15 | 18/15 | 18/15 | 18/15 |

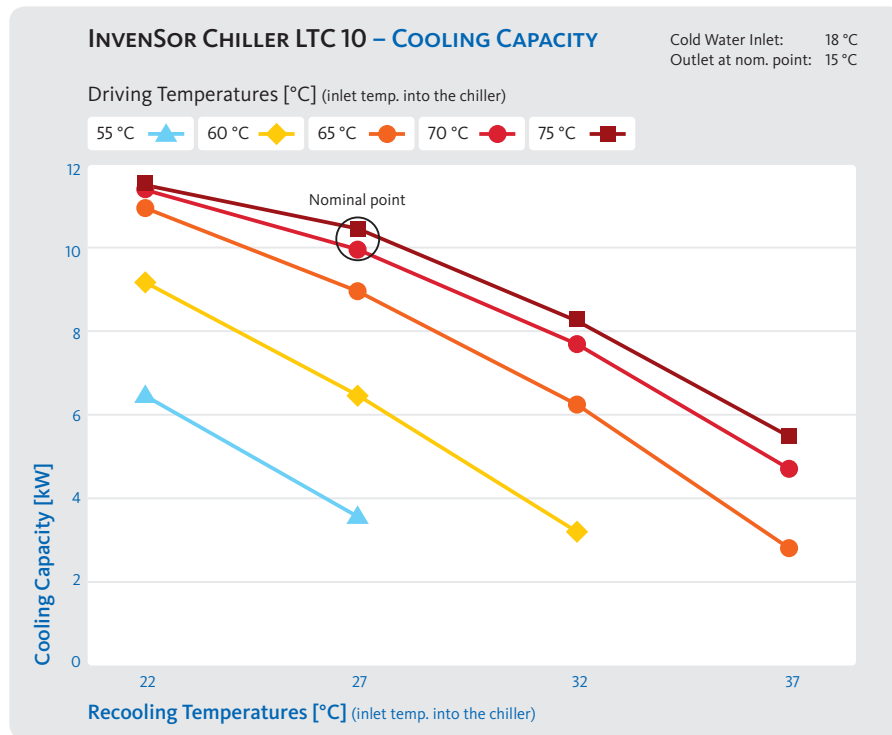
**KUVA 16. Toimintalämpötila adsorptiojäähdyttimissä /24/**

Adsorptiojäähdyttimen teho ja $COP_{\text{lämpö}}$ riippuvat viidestä eri asiasta: jäähdyttimen rakenteesta, jäähdyttimen ohjauksesta, lämmityspiirin lämpötiloista, välijäähdytyspii-

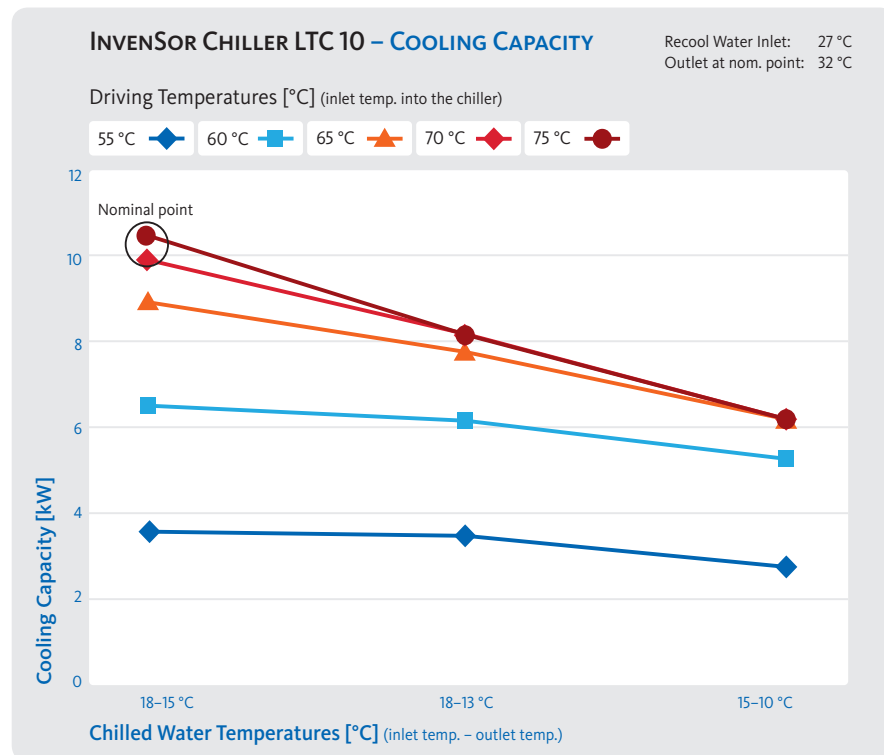
rin lämpötiloista ja jäähdytyspiirin lämpötiloista. Kuvista 17, 18 ja 19 voidaan todeta, kuinka eri lämpötilat vaikuttavat jäähdytystehoon. Kuvassa 17 on esitetty käyttölämpötilojen vaikutus. Kuvassa 18 on esitetty välijäähdytyspiirin lämpötilojen vaikutus ja kuvassa 19 jäähdytyslämpötilojen vaikutus. Järjestelmän energiatehokkuutta voidaan parantaa nostamalla jäähdytettävän veden lämpötilaa, koska tämä vähentää lämmityspiirin tehontarvetta ja pienentää välijäähdytyspiirin tehoa. Jäähdytyslämpötilan nosto vaikuttaa positiivisesti myös laitteisto- ja käyttökustannuksiin. /17./ Jäähdytinvalmistajat merkitsevät usein jäähdyttimen optimaalisen toimintapisteen hyötysuhdekuvauksiinsa (kuvat 17-, 18- ja 19 nominal point).



KUVA 17. Adsorptiojäähdyttimen toiminta /25/



KUVA 18. Adsorptiojäähdyttimen toiminta /25/



KUVA 19. Adsorptiojäähdyttimen toiminta /25/

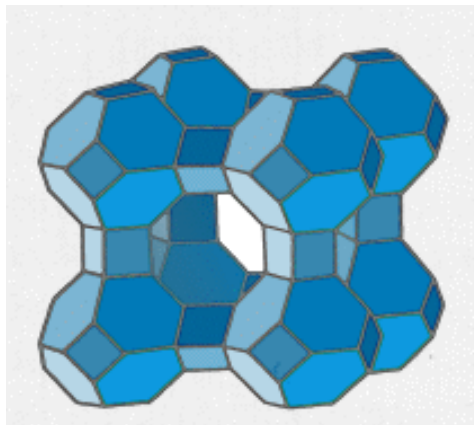
Jaksoittaisen toiminnan takia jäähdyttimessä tulee aikoja, jolloin se ei tuota jäähdytystä. Tasaisen toiminnan takaamiseksi lämpövarastoa suositellaan käytettäväksi kuumen- ja jäähdytetyn veden puolilla. Energiavarastot tekevät ohjauksesta tasaisempaa ja estävät esimerkiksi kuuman puolen lämpöpiikit. Höyrystimen jäätymisen estämi-

seksi täytyy järjestelmään asentaa kylmävarasto, joka kasvattaa piirin lämpömassaa. Jäätymisenesto vaatii oikeanlaisen kylmäpiirin pumpun ohjauksen. Kylmäpiirin pumpun tulisi käydä noin 10 minuuttia jäähdyttimen pysähtyttyä. /18./

6.4 Adsorbenttimateriaalit

6.4.1 Zeoliitit

Synteettiset zeoliitit eli molekyyliseulat ovat kiteisiä metalli-alumiinisilikaaneja. Huokosten koko on vakio ja riippuu rakenteesta. Ominaispinta-ala voi olla jopa $700 \text{ m}^2/\text{g}$. /21./ Zeoliitti koostuu SiO_2 -, AlO_2 - ryhmistä sekä alkali-ioneista. Zeoliitti pystyy adsorboimaan vesihöyryä ja muita kaasumolekyylejä sen monimutkaiseen kristallirakenteeseen. Zeoliitti pystyy adsorboimaan jopa 25 % vettä omamassastaan (kg vettä/kg zeoliittia). Zeoliittia tuotetaan suuria määriä kemialliseen teollisuuteen, minkä takia se on edullista ja helposti saatavaa. /26./

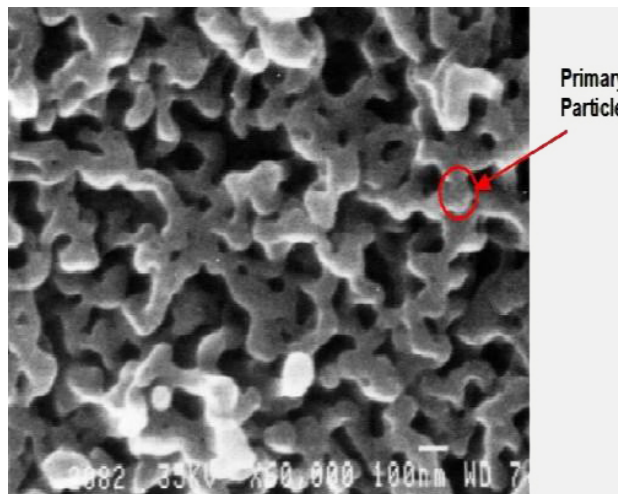


KUVA 20. Zeoliittimateriaali /27/

6.4.2 Silikageeli

Olomuodoltaan silikageeli on geeli-nimestään huolimatta kiinteää ja kovaa. Silikageeli esiintyy puhtaana yhdisteenä hajuttomina, mauttomina, myrkyttöminä, läpinäkyvinä ja pyöreäköinä rakeina, jotka eivät ole vesiliukoisia. Silikageeli omaa suuren pinta-ala suhteen (noin $800 \text{ m}^2/\text{g}$), minkä takia sitä voidaan käyttää kuivausaineena imettäessä vettä. Aine on tunnettu sen erinomaisesta kyvystä absorboida kosteutta suoraan ilmasta. Silikageelirakeet on usein käsitelty vesipitoisuutta ilmentävillä kemikaaleilla, jotka muuttavat väriään kosteuspitoisuuden mukaan. Silikageelirakeet voidaan re-

generoida eli aktivoida uudelleen ts. uudistaa hygroskooppisiksi eli kosteutta sitoviksi lämmittämällä niitä 2 tuntia 120 °C:ssa. /28./



KUVA 21. Silikageelin rakenne /29/

7 RAKENNUSKOHDDE

Kohderakennus on valmistunut kesällä 2011. Toimisto-osan pinta-ala on noin 220m². Toimistossa on lattialämmitys, ja jäähdytyksestä vastaa ilmastointipalkit ja ilmastointikoneen jäähdytyspatteri. Rakennuksen lämmönlähteenä on kaukolämpö. Ilmastointipalkeissa ja ilmastointikoneen jäähdytyspatterissa kiertävä vesi jäähdytetään ammoniakijäähdytyslaitteistolla.

Olemassa olevien laitteistojen rinnalle on suunnitteilla aurinkojäähdytyslaitteisto. Tavoitteena on kattaa mahdollisimman suuri osa jäähdytystarpeesta aurinkojäähdytyksellä. Aurinkojäähdytysjärjestelmä mitoitetaan täysteholle, vaikka tehopiikkien aikana rinnalla olevalla ammoniakijäähdytystä voidaan käyttää jäähdytystarpeen täydentämiseen.

7.1 Laitteiston vaatimukset

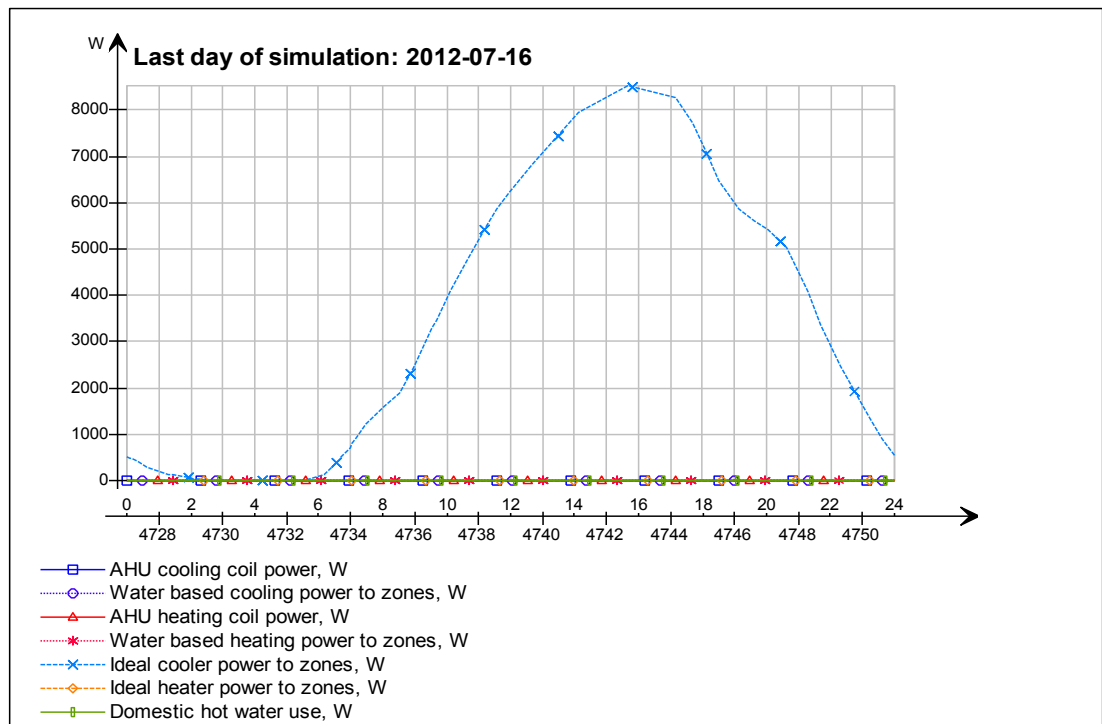
Rakennuksen jäähdytysjärjestelmään on liitetty toimiston ilmastointipalkit ja ilmastoinnin jäähdytyspatteri. Ilmastoinnin jäähdytyspatteri on mitoitettu 7/12°C lämpötiloille ja jäähdytyspalkit 15/18°C, lämpötiloille. Adsorptiojäähdyttimellä ei ole järkevää tuottaa 7°C lämpötiloja, joten järjestelmässä on tehtävä kompromissi. Järkevä ratkaisu on tuottaa jäähdyttimellä 13°C vettä. Ongelmaksi muodostuu tällöin ilmas-

tointipatterin jäähdytysteho. Tähän ratkaisuksi voidaan lisätä sen virtaamaa tai priimata adsorptiojäähdyttimeltä lähtevää 13°C kylmää ammoniakkijäähdytyslinjasta tulevalla 7°C vedellä. Tämä vaatii muutoksia nykyisiin kylmäpiireihin. Koska jäähdytyspalkkien mitoituslämpötilat ovat, 15/18°C olisi järkevää kytkeä ilmastointipatterin paluu jäähdytyspalkkien menoputkeen 3-tie-venttiilillä. Koska toimistossa on lattia-lämmitys, voidaan jäähdytyspalkeilta palaavaa kylmää käyttää edelleen käyttäen lattiajäähdytyksessä. Näin pystyttäisiin hyödyntämään kylmän tuotto parhaalla hyötysuhteella.

Aurinkojäähdytysjärjestelmänjärjestelmän ulkoilman kanssa kosketuksessa olevat nestelinjat täytetään vesi-glykoli-seoksella, jonka pakkaskestävyys riittää -30°C asti. Tämä tarkoittaa noin 40-50 % glykolipitoisuutta. Glykolipiirien levylämmönsiirtimet mitoittaa lämmönsiirrinvalmista annetuilla tehoilla ja lämpötiloilla. Suunnitelmissa kullekin lämmönsiirtimelle on laskettu 2 K lämpötilaero.

7.2 Jäähdytystarve

Toimitilojen ilmoitettu jäähdytysteho on 13kW. Rakennus mallinnettiin IDA ICE-simulointiohjelmalla. Mitoituksessa tuloilmanlämpötila oli ulkolämpötila. Jäähdytystehoksi saatiin 9 kW (41 W/m²) ja kuumimman päivän jäähdytysenergiantarpeeksi 56 kWh/vrk (255 Wh/m²vrk) käyntiajalla 7-17. Jäähdytystarvetta rakennuksessa esiintyi kesäkuussa, heinäkuussa ja elokuussa. Pääpaino jäähdytystarpeesta on kuitenkin heinäkuussa. Laitteiston mitoituksessa käytetään 20 % varmuusmarginaalia, jolloin jäähdytystehoksi saadaan noin 11 kW ja jäähdytysenergiantarpeeksi 68 kWh/vrk. Kun rakennuksen jäähdytyksen käyntiaika on arkisin klo 7-17, saadaan jäähdytystehon keskiarvoksi 6,8 kW/vrk. Jäähdytin ja siihen liittyvät komponentit mitoitetaan vähintään tälle teholle. Jäähdytin toimii 18/13°C lämpötiloilla. Mitoittavana jäähdytysajan ulkolämpötilana on 23°C.



KUVA 22. Rakennuksen jäähdytystehontarve

8 LAITTEISTON MITOITUS

8.1 Jäähdyttimen valinta

Jäähdyttimeksi valikoitui InvenSor:in valmistama LTC 10 Plus, jossa on integroituna järjestelmän tarvitsemat pumpput. Jäähdyttimen valintaan vaikuttivat sen matalat toimintalämpötilat, jotka sopivat hyvin tasokeräinten kanssa. Toinen valintaan vaikuttava tekijä oli laitteen hyvä hyötysuhde koko toiminta-alueella. Laitetta ajetaan pääasiassa 18/13°C jäähdytyslämpötilalla ja 65°C käyttölämpötilalla, jolloin sen kylmäteho on 7,8 kW ja COP on 0,6. Tässä pisteessä toimiessaan jäähdytin kattaa helposti normaalit jäähdytystarpeet.

8.2 Keräimien mitoitus

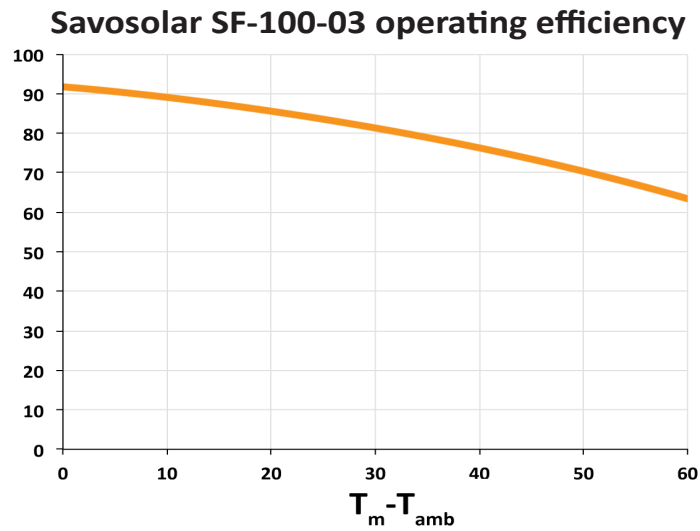
Keräimet mitoitetaan jäähdyttimen täydelle teholle, koska ylimääräisen varakapasiteetin rakentaminen on järkevää tässä vaiheessa. Jäähdytin saavuttaa nimellistehonsa 9,8 kW, kun jäähdytyspiiri toimii 18/15°C lämpötiloissa, välijäähdytyspiiri 32/27°C lämpötiloissa ja kuumapiiri 70/64°C. COP on tällöin 0,6 ja lämmitystehontarve 16,4 kW. Oletetaan, että noin 20 % lämmitysenergiasta häviää matkalle lämmönsiirtimissä, put-

kistoissa ja lämpövaraajassa. Keräimien hetkittäiseksi tehoksi saadaan tällöin noin 20 kW. Kuumimpana päivä jäähdytystarvetta on noin 6h. Tällöin lämmitysenergian tarpeeksi saadaan 120 kWh/vrk.

Kerääjien määrää valittaessa apuna käytetään Get Solar-ohjelmaa, jolla voidaan mallintaa aurinkolämmityslaitteistoja. Mallinnuksessa käytetään Savosolar SF-100-03-keräimiä, joita ajetaan 55/75°C lämpötiloilla ja kerääjät sijoitetaan 40° kulmaan. Kun keräinneliömetrejä on 30 m², saadaan keräimistä heinäkuussa 5200 kWh (kuva 23). Kerääjän hyötysuhteen ollessa 0,75 (kuva 24) saadaan päivittäin kerättyä 126 kWh. Näin ollen 30 m² aurinkokerääjiä saadaan katettua adsorptiojäähdyttimen lämmöntarpeet sen suurimmalla jäähdytysteholla. Yhden SF-100-03-keräimen pinta-ala on 2 m², joten keräimiä tarvitaan 15 kappaletta.

| Project: | | Solare Kombianlage | | | |
|------------------|----------------------|---|----------------------------------|---|-------------------|
| Location: | | Mikkeli | Latitude: | 62.4° | |
| Collector: | | 30.00 m ² | | Savosolar SF-100-03 | |
| Characteristics: | | eta0 = 0.910 | a1 = 2.305 W/(m ² ·K) | a2 = 0.0370 W/(m ² ·K ²) | |
| Mounting angle: | | 40.0° | | Azimuth: 0.0° | |
| System type: | | Solar domestic hot water tank | | | |
| Tank: | | 100000000 litres | | | |
| temperature: | | max. 75°C | | | |
| | | min. 55°C | | | |
| required energy: | | 480.01 kWh/day = 20637 litres/day from 55°C to 75°C | | | |
| Month | solar yield [kWh] | solar irradiation [kWh] | back up energy [kWh] | solar fraction [%] | efficiency [%] |
| January: | 223 | 1102 | 0 | 0 | 20 |
| February: | 597 | 2006 | 0 | 0 | 30 |
| March: | 1373 | 3397 | 0 | 1 | 40 |
| April: | 1881 | 4073 | 0 | 1 | 46 |
| May: | 2527 | 4865 | 0 | 2 | 52 |
| June: | 2582 | 4737 | 0 | 2 | 55 |
| July: | 3073 | 5200 | 0 | 3 | 59 |
| August: | 2345 | 4172 | 0 | 2 | 56 |
| September: | 2068 | 3778 | 0 | 2 | 55 |
| October: | 737 | 1989 | 888004 | 1 | 37 |
| November: | 249 | 1040 | 427256 | 0 | 24 |
| December: | 167 | 806 | 0 | 0 | 21 |
| Total: | 17823 | 37165 | 1315260 | 1 | 48 |

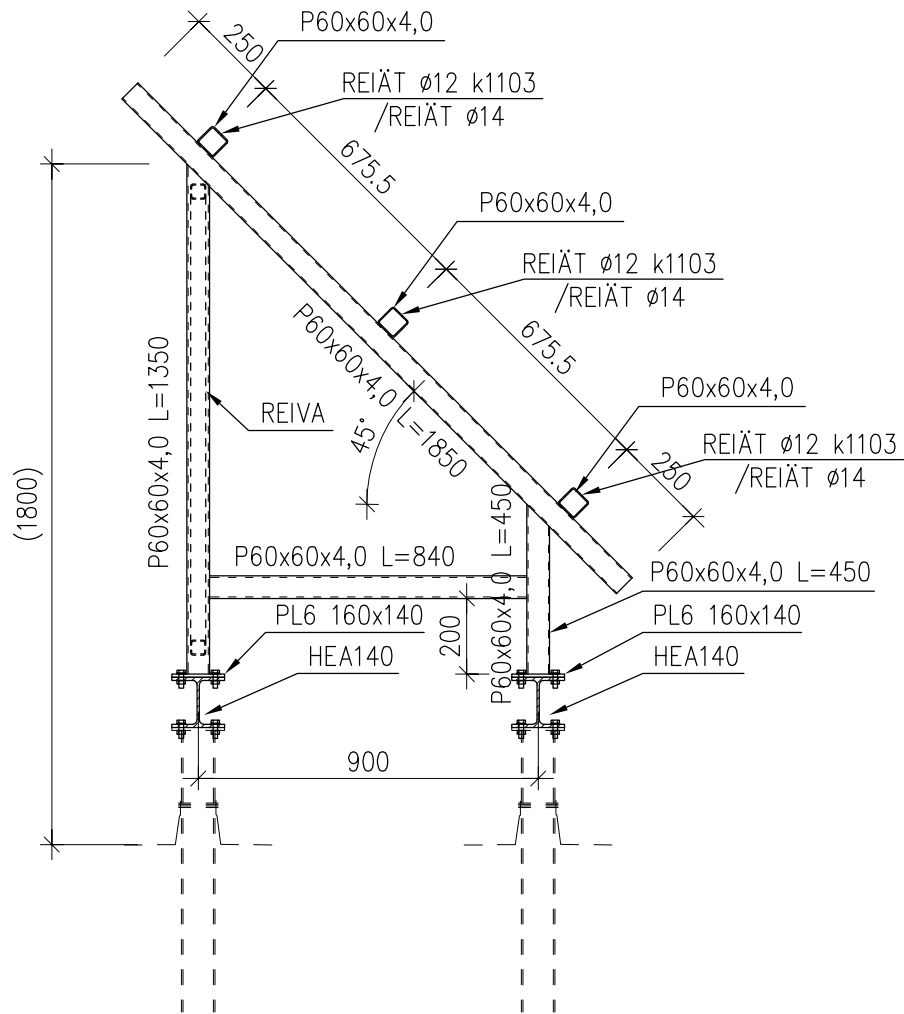
KUVA 23. Aurinkoenergian keräys



KUVA 24. Keräimen hyötysuhdekäyrä /30/

8.3 Keräimien sijoitus

Aurinkokeräimet sijoitetaan uuden toimisto-osan katolla oleville palkeille. Palkkirivistöjä on kolme (kuva 27). Kahdelle pidemmälle riville asennetaan 6 kerääjää per palkki ja lyhyelle palkille 3 kerääjää. Keräimet kiinnitetään alumiiniprofiilitelineisiin 40° kulmaan kattopintaan nähden (kuva 25).



KUVA 25. Keräimien asennustelineet /31/



KUVA 26. Keräimien kiinnityspalkit katolla /31/



KUVA 27. Keräimien kiinnityspalkit katolla /31/

8.4 Nestejäähdyttimen mitoitus

Nestejäähdyttimen mitoittava teho saadaan laskemalla lämmitys- sekä jäähdytyspiiri- en tehot yhteen. Lämmityspuolen suurin teho oli 16,4 kW ja jäähdytyspuolen 9,8 kW. Välijäähdytyspuolen lämmönsiirtotehoksi saadaan tällöin 26,2 kW. Nestejäähdytin mitoitetaan 30/25°C lämpötiloille ja 23°C ulkolämpötilalle.

Nestejäähdyttimen valinnassa käytettiin apuna Fincoilin valintaohjelma. Määritetyillä arvoilla saatiin valittua fincoilin SJG-17-1400-jäähdytin.



KUVA 28. Nestejäähdytin /32/**8.5 Lämpö- ja kylmävaraajien mitoitus**

Koska kyseessä on adsorptiojäähdytin, ei suuria kylmä- tai kuumavarastoja tarvita. Varaajia käytetään vain käynnin tasaamiseen, koska taustalla on kuitenkin suuri ammoniakkijäähdytyslaitos (pilvisinä päivinä ei tarvita lämmön varastointia). Varaajiksi valitsin AKVATERM:in valmistamat.

Kylmävaraaja mitoitetaan siten, että jäähdytin toimii 15/10°C lämpötiloissa 6,1 kW teholla. Näillä lämpötiloilla taataan riittävä jäähdytysteho myös jäähdytyspatterille. Kuumimpana päivänä jäähdyttimen teho riittää klo 7-12 välisenä aikana, klo 12–17 väliselle ajalle tarvitaan kylmävarasto, jotta riittävään jäähdytystehoon päästään. Kylmävaraajaan ladataan klo 6-12 välisenä aikana klo 12–17 välille tarvittava lämpöteho. Klo 12–17 jäähdytysenergiantarve on 40 kWh, josta varaajan tulisi kattaa 9,5 kWh. Varaajan koko lasketaan kaavalla 4. Kylmävaraajan kooksi saatiin 0,82 m³, joten pienin riittävä varaaja on 1 m³ varaaja kylmäpuolelle. 1 m³ kylmävaraajan lämpöhäviöteho on 15°C keskilämpötilalla on noin 20-25 W, häviöillä ei ole vaikutusta varaajamitoitukseen /34./

$$Q = mc_p \Delta t = \rho V c_p \Delta t \quad (4)$$

$$V = \frac{Q}{\rho c_p \Delta t} = \frac{9,5kWh * 3600}{1000 \frac{kg}{m^3} * 4,2 \frac{kJ}{kgK} * 10K} = 0,82m^3$$

| | |
|----------------|--|
| Q | on varattava energiamäärä, kWh |
| 3600 | on muuntokerroin (1 kWh=3600 kJ) |
| V | on varaajan vaadittu koko, m ³ |
| ΔT | on lämpötilaero, joka varaajasta voidaan purkaa, K |
| c _p | on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK |
| ρ | on veden tiheys, kg/m ³ . |

Lämpövaraaja mitoitetaan tasaamaan koneen käynti. Varaaja mitoitetaan huipputehontarpeelle kuumimpana päivänä ja tilanteelle, jossa aurinkolämpöä ei saada jostain syystä kerättyä kahteen tuntiin. Kuumimpana päivänä jäähdytystehon keskimääräinen tarve oli 6,8 kW ja 0,6 hyötysuhteella toimivan jäähdyttimen lämmitystehontarve tällöin 11,3 kW, tällöin varattava energiamäärä on 22,6 kWh. Varaajan koko lasketaan kaavalla 5. Tässä tapauksessa varaajan minimikooksi saatiin 0,88 m³ ja varaajaksi valittiin 1 m³ varaaja. 1 m³ lämminvesivaraajan lämpöhäviöteho on 65°C keskilämpötilalla on noin 100 W, häviöillä ei ole vaikutusta varaajamitoitukseen /34./

$$Q = mc_p \Delta t = \rho V c_p \Delta t \quad (5)$$

$$V = \frac{Q}{\rho c_p \Delta t} = \frac{22,6 \text{ kWh} * 3600}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * 22 \text{ K}} = 0,88 \text{ m}^3$$

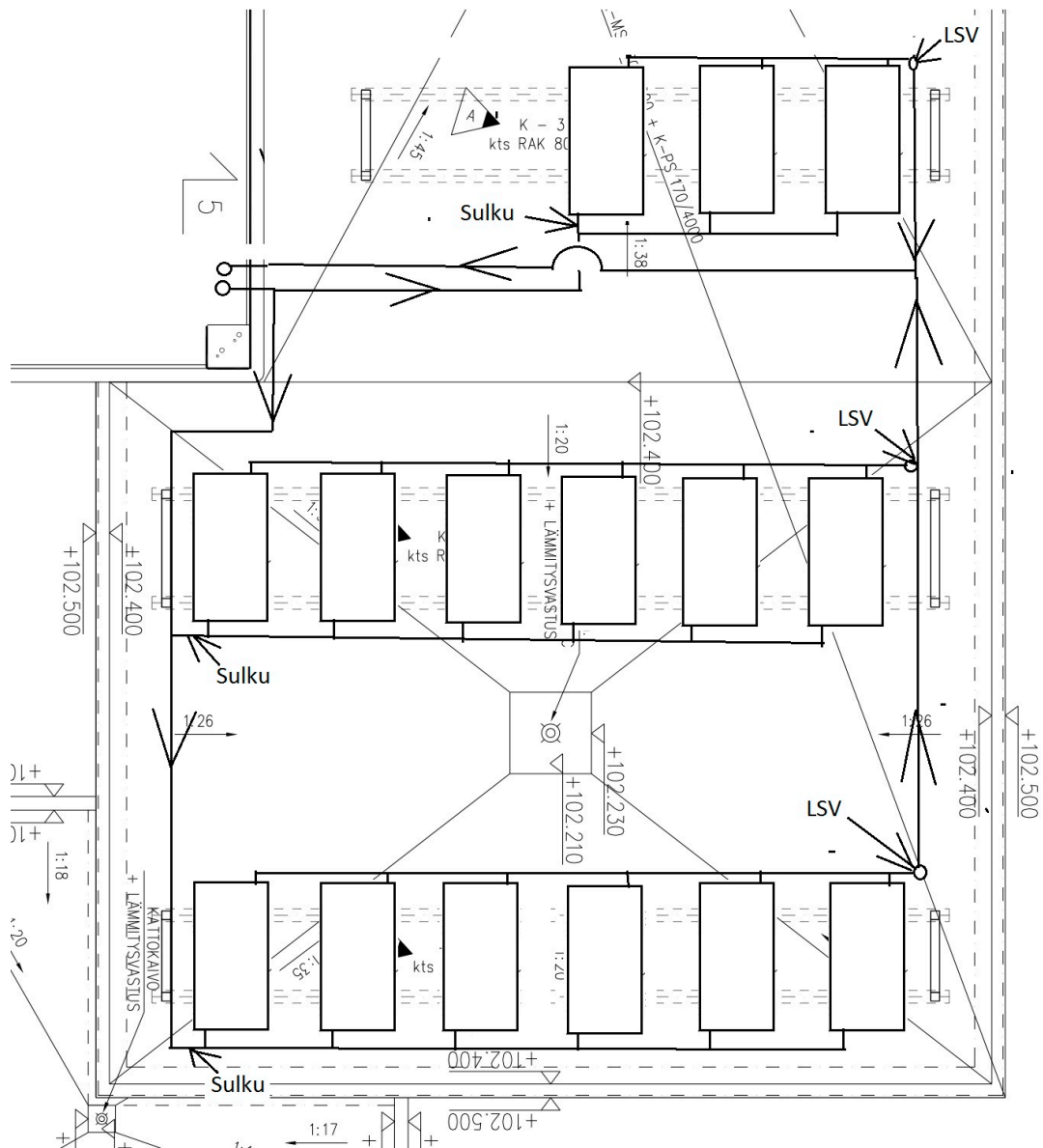
| | |
|----------------|--|
| Q | on varattava energiamäärä, kWh |
| 3600 | on muuntokerroin (1 kWh=3600 kJ) |
| V | on varaajan vaadittu koko, m ³ |
| ΔT | on lämpötilaero, joka varaajasta voidaan purkaa, K |
| c _p | on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK |
| ρ | on veden tiheys, kg/m ³ . |

8.6 Putkilinjat

Putkilinjoja suunniteltaessa tärkeintä on hyvä eristystaso. Hyvällä eristyksellä parannetaan adsorptiojäähdytysjärjestelmän hyötysuhdetta lämpöhäviöiden vähentyessä. Myös rakennuksen sisällä eristys on tärkeää, koska hallia, joiden läpi lämpölinjat kulkevat, jäähdytetään kesällä. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien putkitukset on esitetty liitteistä 1 ja 2.

8.6.1 Keräimien putkilinjat

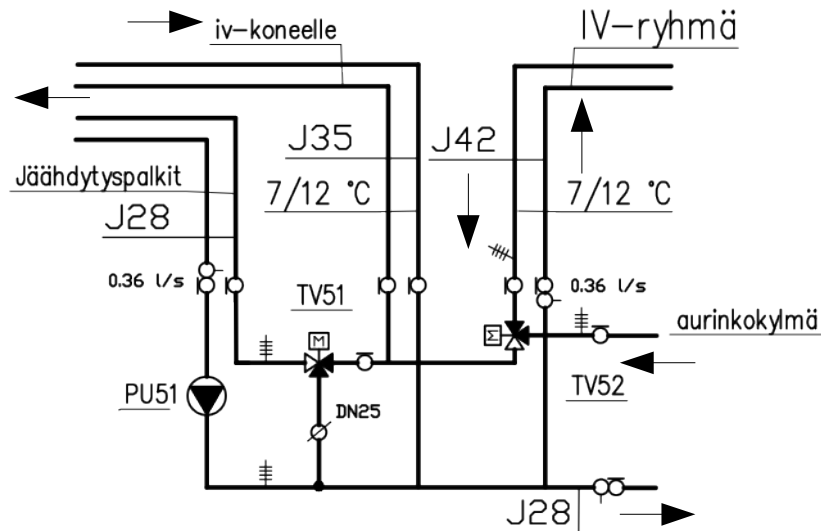
Aurinkokeräinten kytkennät vesikatolla toteutetaan niin sanotulla ”käännetty paluu kytkennällä”. Tällä kytkennällä saadaan tasaiset virtaamat kaikille linjassa oleville kerääjille, koska painehäviöt ovat samat kaikille kerääjille linjassa. Jokaisen palkin linjan alkuun asennetaan sulku ja loppuun linjasäätöventtiili (kuva 29). Keräimeltä palaavaan putkeen rakennetaan nousun kohtaan ilmapussi ja tämä varustetaan ilmauksella. Kaikki keräimien linjat eristetään katolta varaajalle asti aurinkolaadun solukumieristeellä.



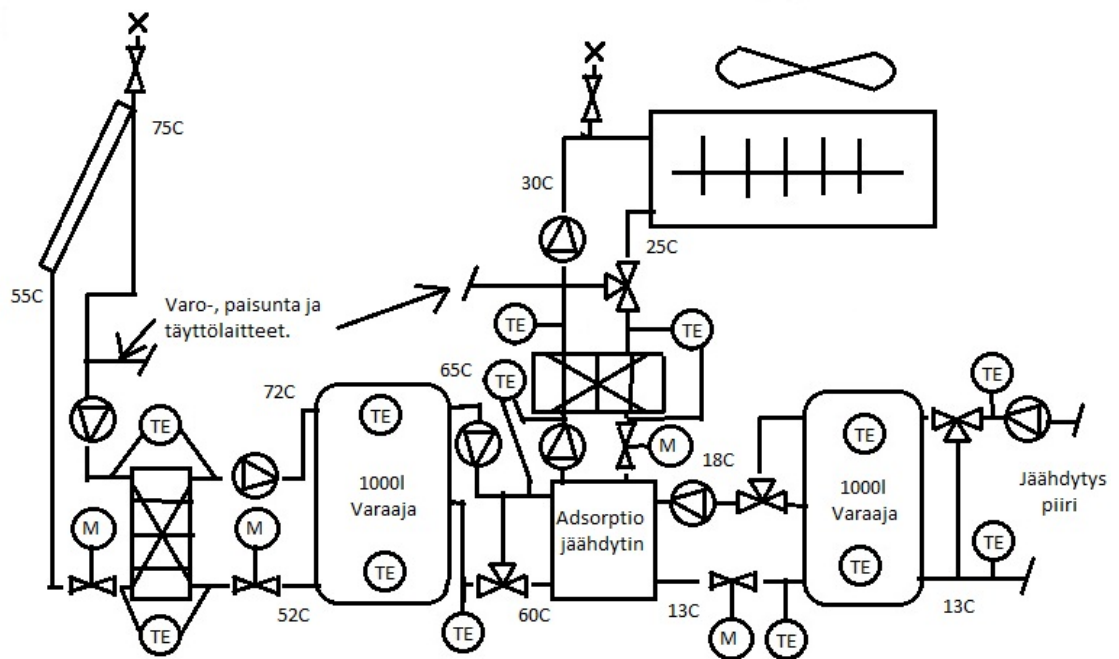
KUVA 29. Aurinkokeräimien kytkennät katolla

8.7 Kytkentäkaavio

Laitteisto kytketään kuvan 31 mukaisesti. Kuvassa 31 olevat lämpötilat ovat normaali-tilassa toimivan jäähdyttimen käyttölämpötilat. Kuvasta puuttuvat huoltosulut sekä tyhjennysventtiilit ja lämmitysverkon liitokset lämminvesivaraajaan, nämä asennetaan hyvän rakennustavan mukaisesti laitteistoon. Kuvassa 30 näkyvät jäähdytyspiirin putket kytketään jo olemassa olevaan venttiiliryhmään.



KUVA 30. Kylmäpuolen venttiiliryhmä /31./



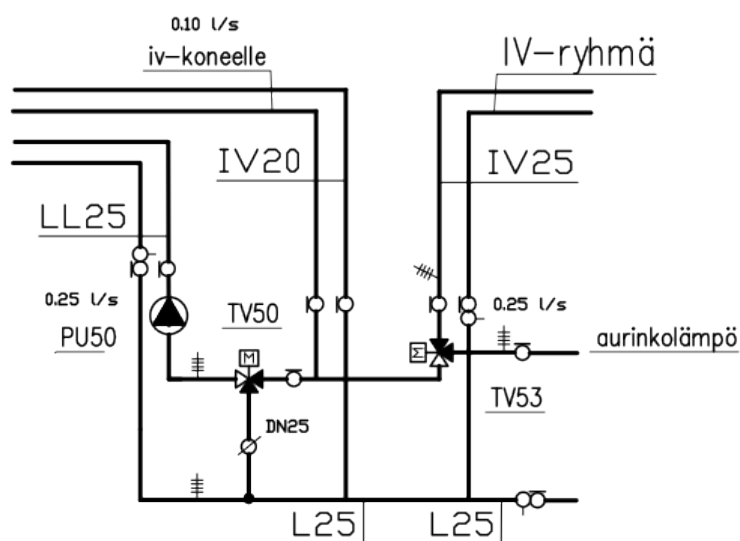
KUVA 31. Laitteiston kytkentäkaavio

8.8 Laitteiston ohjaus

Adsorptiojäähdyttimen käyntiä ohjaa automaatiojärjestelmä ulkolämpötila-anturin mukaan. Kun ulkolämpötila ylittää asetusarvon ($15-18^{\circ}\text{C}$), saa jäähdytin käyntiluvan ja alkaa jäähdyttää varaajaa asetettuun arvoon ($10-15^{\circ}\text{C}$). Kun varaajan yläosan lämpötila saavuttaa halutun lämpötila-arvon, lopettaa jäähdytin käyntinsä. Koska adsorptiojäähdyttimessä ei ole juurikaan liikkuvia tai kuumenevia osia, sitä voidaan käyttää pitkiäkin aikoja yhtäjaksoisesti. Jos lämminvesivaraajan lämpötilat ovat liian matalat ($<55^{\circ}\text{C}$), ei jäähdytin käynnisty, koska adsorptiojäähdytin tarvitsee vähintään 55°C vettä toimiakseen.

Välijäähdytyspiirin pumppua ja kattojäähdytintä ohjataan jäähdyttimelle tulevan nesteenlämpötilan mukaan ($22-30^{\circ}\text{C}$), tämän lämpötilan tulisi pysyä vakiona tasaisen käynnin aikaansaamiseksi.

Lämminvesivaraajaa ladataan aina, kun keräimiltä saadaan lämpöä talteen. Varaajan lämpötilan yläraja on 75°C , tällä lämpötilalla tasokeräimet toimivat vielä hyvällä hyötysuhteella. Lämminvesivaraajan lataaminen lopetetaan, kun varaajan ylä- ja alaosan välillä on 5K lämpötilaero. Varaajaan ladataan ympärivuotisesti, koska syksyllä ja keväällä aurinkokeräimiä voidaan hyödyntää rakennuksen lämmitykseen ajamalla varaajan lämpö lämmitysverkostoon (kuva 32).



KUVA 32. Aurinkolämpöventtiiliryhmä /31/

9 POHDINTA

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella aurinkojäähdytyksen soveltumista Suomen olosuhteisiin ja esittää suunnitelmat laitteiston rakentamiseen. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että adsorptiojäähdyttimen sopii myös Suomen olosuhteisiin. Jäähdyttimellä pystyttäisiin kattamaan koko vuosittainen jäähdytysenergian tarve, jos aurinkonpaisteessa ei olisi katkoksia. Adsorptiojäähdytysjärjestelmä itsessään ei vaadi vakituksia huoltoja tai tarkastuksia, eikä se sisällä ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Huoltoa vaativat lähinnä järjestelmään liitetyt apulaitteet, kuten pumput, venttiilit ja automaatiikka. Näilläkin osilla odotettu toiminta aika on yli 10 vuotta.

Energiatehokkuudeltaan adsorptiojäähdytys on huippuluokkaa. Suomessa ainut tehokkaampi jäähdytyksentuottotapa on maajäähdytys, mutta alueilla, joissa porakaivojen tekeminen on mahdotonta, on adsorptiojäähdytys energiatehokkain tapa tuottaa kylmää. Hyvällä kompressorikylmälaitoksella tuotetussa kylmässä saavutetaan $COP_{sähkö}$ -arvo 3, mutta adsorptiojäähdyttimellä voidaan päästään $COP_{sähkö}$ -arvoon 5. Tällä hetkellä Suomessa sähkön hinta on vielä niin matala, että kompressorijäähdytys on vielä kannattavampaa. Tulevaisuudessa sähköenergian hinta tulee kuitenkin nousemaan maailmalaaajuisesti vielä huomattavasti. Sähköenergian hinnannousu pakottaa siirtymään tehokkaampiin jäähdytysratkaisuihin. Tämän takia uskon adsorptiojäähdytyksen olevan tulevaisuudessa varteenotettava kilpailija perinteiselle kompressorijäähdytykselle.

Tehokkaan jäähdytys- ja lämmityslaitteiston takana on matalat lämpötilaerot huonetilan ja sitä lämmittävän tai jäähdyttävän laitteiston välillä. Näihinkin vaatimuksiin adsorptiojäähdytin yhdistettynä aurinkokeräimiin on omillaan. Jäähdytin toimii hyvällä hyötysuhteella 18/15°C vettä rakennuksen jäähdytysjärjestelmään. Koska adsorptiojäähdytin ei tarvitse korkeita käyttölämpötiloja, voidaan sen kanssa käyttää tasokeräimiä hyvällä hyötysuhteella.

Kohderakennuksessa ainoaksi ongelmaksi muodostui ilmastointipatterin matalat 7/12°C suunnittelulämpötilat. Kohteeseen valittu jäähdytin ei pysty tuottamaan tehokkaasti näin matalalämpöistä vettä. Adsorptiojäähdyttimen tuottamaan veteen voidaan joutua sekoittamaan kompressorilaitoksessa tuotettua vettä. Aurinkokeräimien luku-

määrän mitoituksessa päädyttiin turvalliseen 3 m^2 keräimiä/ kW_j. Todennäköisesti pinta-alatarve on huomattavasti pienempi. Jos adsorptiojäähdytysjärjestelmästä tehdään kaupallinen versio, tutkimustyötä vaaditaan varsinkin tarkkaan keräinmitoitukseen, jolla on suora vaikutus koko järjestelmän perustushintaa.

Kuten jo aikaisemmin on todettu, adsorptiojäähdytin toimii parhaiten pienillä lämpötilaeroilla. Savosolarin toimisto on lähes täydellinen kohde aurinkoavusteisen adsorptiojäähdytyksen toteuttamiseen. Lämmitys hoidetaan ilmastointipatterilla ja lattialämmityksellä ja jäähdytys jäähdytyspalkeilla ja tuloilmalla. Järjestelmää voitaisiin tehostaa vielä lämmittämällä käyttövetä aurinkoenergialla. Kyseisessä rakennuksessa käyttövedenlämmitys tapahtuu kuitenkin kaukana aurinkolämmitysjärjestelmän sijainnista, mikä tekee aurinkoenergian hyödyntämisestä siinä kannattamattomaksi. Toimistotiloissa lämpimän käyttöveden kulutus on lisäksi pientä. Simulointien perusteella aurinkoenergian käyttämistä lämpimän käyttöveden tuotannossa ja käyttövedenkierron lämmittämisessä tulisi hyödyntää aina, kun mahdollista. Oikein mitoitettu aurinkolämmitysjärjestelmä pystyy kattamaan käyttöveden koko lämmitystarpeen kesäaikaan ja jopa 60 % käyttöveden lämmitystarpeesta vuositasona.

Suurimmat markkinat adsorptiojäähdytykselle löytyvät vielä Etelä-Euroopasta, missä jäähdytystarvetta voi olla lähes ympärivuotisesti. Siellä aurinkoavusteisella adsorptiojäähdytyksellä voitaisiin tuottaa lähes kaikki tarvittava energia lämmitykseen, jäähdytykseen ja käyttöveden lämmitykseen.

Adsorptiojäähdytyksen taloudellista kannattavuutta ei tässä työssä tarkasteltu, vaan paneuduttiin teknisiin näkökulmiin. Suunnittelussa huomio kohdistui vähiin kokemuksiin adsorptiojäähdyttimien ja laitteistojen mitoituksista. Kokemusperäistä tietoa ja mittaustuloksia kaivattaisiin siis enemmän. Tämä tuleva järjestelmä antaa hyvät valmiudet järjestelmän toiminnan optimoimiseen ja tarkempaan kannattavuuslaskelmiin, joiden perusteella aurinkojäähdytyksestä voidaan tehdä teknologisesti hyvä ja kannattava paketti.

LÄHTEET

1. Solpros Ay. Aurinkolämpöjärjestelmien perusteet, mitoitus ja käyttö. 2006. WWW-dokumentti. <http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/OPAS.pdf>. Luettu 3.2.2012.
2. Erat, Bruno jne. Aurinko-opas: aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo Painoyhtymä Oy. 2008.
3. Haining Xianke Solar Energy Technology Co, Ltd. WWW-dokumentti. <http://www.solarhotwatersystem.net/fi/>. Luettu 3.2.2012.
4. Adam Solar Resources. WWW-dokumentti. <http://www.adamsolarresources.com/solarthermal.html#solarthermal>. Luettu 18.2.2012.
5. Motiva Oy. Auringosta lämpöä ja sähkö. WWW-dokumentti. http://www.motiva.fi/files/2220/AurinkoEnergia_www.pdf. Luettu 3.3.2012.
6. Renewable energy world. 2004. WWW-dokumentti. <http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals4/figure1.gif>. Luettu 3.3.2012.
7. Laitinen, Jussi. Pieni suuri energiakirja. Into kustannus Oy. 2010.
8. Energia auringosta Oy. WWW-dokumentti. www.energia-auringosta.fi. Luettu 3.3.2012.
9. Kukko, Juha. Uusi Suomi. 2008. Näin otat talteen auringon lämmön. Verkkolehti. <http://www.uusisuomi.fi/kotimaa/31100-nain-otat-talteen-auringon-lammon>. Luettu 3.3.2012.
10. Evergreen energy solutions. WWW-dokumentti. www.evergreen-solutions.co.uk. Luettu 3.3.2012.
11. Jodat Ympäristöenergia Oy. Aurinkokeräimen teho ja tuotto. 2007. http://www.y-energia.com/aurinkolampo/teho_ja_tuotto/teho_ja_tuotto.html. Luettu 7.3.2012.
12. Hietamäki, Minttu. 2008. Induktiosulatusuunin jäähdytysveden lämmön talteenotto ja hyväksikäyttö. WWW-dokumentti. <http://www.lux.fi/Induktiouunin%20jäähdytysveden%20lämmöntalteenotto.%2025.4.08.pdf>. Luettu 7.3.2012.
13. Jodat Ympäristöenergia Oy. Varaaja. 2007. <http://www.y-energia.com/aurinkolampo/varaaja/varaaja.htm>. Luettu 7.3.2012.
14. Lund, Peter. 2000. Aurinkolämmön itserakennusopas. WWW-dokumentti. <http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/SolarGuide.PDF>. Luettu 7.3.2012.
15. Tuunanen, Jutta. Absorptiotekniikka elintarviketehtaan jäähdytyksessä. Opinnäytetyö. Mikkeli. 2007.
16. GBU. 1999. Adsorption chiller NAK. WWW-dokumentti. <http://www.gbunet.de/outgoing/nak-prospect.pdf>. Luettu 10.3.2012.

17. Invensor. 2010. Invensor cooling system. WWW-dokumentti.
<http://www.invector.com/en/technology/cooling-system.htm>. Luettu 12.3.2012.
18. Sabatelli, V jne. 2005. Classification of adsorption chillers. WWW-dokumentti.
<http://www.scribd.com/doc/46344047/13/Classification-of-adsorption-chillers>. Luettu 15.3.2012.
19. Nienborg, Björn. 2010. Solar-assisted heating and cooling of buildings: technology, markets and perspectives. WWW-dokumentti.
http://www.solarserver.com/solarmagazin/solar-report_0210_e.html. Luettu 15.3.2012.
20. Balaras, Constantinos. 2006. Solar cooling: an overview of European applications & design guidelines. WWW-dokumentti. http://gwri-ic.technion.ac.il/pdf/Professors/Gershon_Grosman/3.pdf. Luettu 15.3.2012.
21. Aittomäki, Antero. Kylväteknikka. Suomen Kylväyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 2008.
22. Solair. 2009. Guidelines. WWW-dokumentti. http://www.solair-project.eu/uploads/media/SOLAIR_Guidelines_EN.pdf. Luettu 18.3.2012.
23. Sabatelli, V jne. 2005. Technical status report on solar desalination and solar cooling. WWW-dokumentti. http://www.swt-technologie.de/NEGST5_D1.PDF. Luettu 18.3.2012.
24. Hug, Rolf. 2010. Cooling with Solar Heat: Growing Interest in Solar Air Conditioning. WWW-dokumentti.
<http://www.solarserver.com/solarmagazin/artikeljuni2002-e.html>. Luettu 18.3.2012.
25. Solair. 2005. Adsorption. WWW-dokumentti. http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines05_adsorption.pdf. Luettu 19.3.2012.
26. Invensor. 2012. LTC10 Datasheet. WWW-dokumentti.
http://www.invector.com/en/pdf/LTC10_plus_Datasheet_EN_web_20120124.pdf. Päivitetty 1/2012. Luettu 20.3.2012.
27. Kreuslerr, Siegfried. EXPERIMENTS ON SOLAR ADSORPTION REFRIGERATION USING ZEOLITE AND WATER. WWW-dokumentti.
http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/26_Siegfried_Kreussler_EXPERIMENTS_ON_SOLAR_ADSORPTION_REFRIG.pdf. Luettu 20.3.2012.
28. Chemie, Arnold. WWW-dokumentti. <http://www.arnold-chemie.de/grafik/zeolith-a.gif>. Luettu 20.3.2012.
29. Wikipedia. WWW-dokumentti. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Silikageeli>. Päivitetty 24.4.2012. Luettu 21.3.2012.
30. Grace. WWW-dokumentti.
<http://www.grace.com/engineeredmaterials/images/SilicaGel.JPG>. Luettu 21.3.2012

31. Savosolar Oy. WWW-dokumentti.
<http://www.savosolar.fi/images/stories/downloads/savosolar-sf-100-03-technical-datasheet-v5.pdf>. Luettu 24.3.2012.
31. Sähköpostikeskustelu Savosolarin Aki Matilaisen kanssa 12.1-20.4.2012.
33. Fincoil. WWW-dokumentti. www.fincoil.fi. Luettu 24.3.2012
34. Puhelinkeskustelu AKVATERM:in edustajan kanssa. 23.4.2012

